



Fábio Miguel de Oliveira Pereira

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de
Computadores

Sistema automático de vigilância de nível de baterias em veículo autónomo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Pedro Alexandre da Costa Sousa, Professor
Doutor, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: João Paulo Pimentão, Professor
Doutor, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor José António Barata de Oliveira

Arguente: Prof. Doutor Stanimir Soyakov Valtchev

Vogais: Prof. Doutor Pedro Alexandre da Costa Sousa

Prof. Doutor João Paulo Branquinho Pimentão



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2013

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

Sistema automático de vigilância de nível de baterias em veículo autónomo

Copyright © Fábio Miguel de Oliveira Pereira, FCT/UNL, UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

Agradecimentos

Desde o início do meu curso superior, contei com a confiança e o apoio de inúmeras pessoas e instituições que, de uma forma ou de outra, me ajudaram a atingir os diversos objectivos a que me propus, e sem as quais esta Dissertação não teria sido possível.

Em primeiro, gostaria de agradecer ao meu orientador, o Professor Pedro Alexandre Sousa e ao meu Co-orientador, o Professor João Paulo Pimentão, pela paciência demonstrada ao longo do meu percurso na Holos.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Electrotécnica pela partilha de saber, que levou directa ou indirectamente, à realização desta dissertação.

Queria deixar também um agradecimento a todos os meus colegas da Holos S.A. pela partilha de conhecimentos e ajuda na realização do trabalho, num ambiente de boa disposição.

Um agradecimento também aos restantes amigos e aos criados aqui nesta instituição, pois foi com eles que convivi e vivi (República dos bananas) bons momentos de companheirismo.

Por fim, mas com especial relevo, um grande obrigado aos meus pais por todo o apoio dado ao longo destes anos pois, sei que nem sempre foi fácil e a eles se deve em muito a pessoa que hoje sou. Um agradecimento também a toda a minha restante família e amigos que sempre me acompanharam ao longo de todo este percurso e, por tudo o que vai para além do mesmo.

A todos vós, muito obrigado!

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

Sumário

As baterias electroquímicas (daqui em diante descritas como apenas baterias, apesar de existirem outros tipos das mesmas) têm a propriedade de conseguirem acumular energia que posteriormente pode alimentar um circuito eléctrico com a ausência de uma ligação à rede eléctrica, permitindo então uma maior mobilidade do mesmo. Graças a este tipo de dispositivo torna-se possível o uso de ferramentas, veículos, e inúmeros outros dispositivos eléctricos em locais onde não existem ligações à rede eléctrica sem que haja a necessidade do transporte de um gerador eléctrico, o que facilita e agiliza em muito a execução do respetivo trabalho. Esse facto aumentou a mobilidade dos equipamentos de tal forma que actualmente todos os equipamentos que têm necessidade de serem móveis o são graças às baterias.

Visto que as baterias são parte importante do nosso quotidiano tornou-se então importante estudá-las de forma a torná-las o mais eficiente possível, dado o reduzido tempo de vida útil destes dispositivos.

Nesta dissertação estuda-se a bateria, nomeadamente os seus ciclos de carga e descarga e as formas mais indicadas de a carregar/descarregar sem que se ultrapassem os limites impostos pela sua capacidade e pelas respectivas reacções químicas responsáveis pela capacidade de armazenar a carga.

São analisados os gráficos respectivos aos ciclos de forma a entender como a bateria vai reagindo à entrada/saída da carga. Com esses dados pretende-se otimizar o uso dessa mesma bateria de modo a aumentar o seu tempo de vida, o que traz grandes vantagens para o meio ambiente pois existem diversos problemas associados ao depósito das mesmas quando atingem o seu final de vida útil. Este é de facto um dos grandes problemas das baterias, visto que a reciclagem dos materiais compósitos das mesmas é extremamente difícil de realizar.

Palavras-chave:

Bateria eléctrica; ciclos carga-descarga, “state of charge”

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

Abstract

The electrochemical batteries (hereafter described only as batteries, although there are other types of) have the property that they can accumulate energy that can then subsequently drive an electrical circuit in the absence of a connection to the grid, allowing greater mobility. With this kind of device it is possible the use of tools, vehicles, and numerous other electrical devices in places where there are no connections to the power grid without the need of transporting an electrical generator, which greatly facilitates and expedites the execution of the respective work. This fact increased the mobility of devices so that all devices which currently need to be mobile are so due to the batteries. Since the batteries are an important part of our daily lives it has become important to study them in order to make them as efficient as possible, given the limited lifetime of these devices (due to repeated cycles of charging and discharging) This dissertation studies the battery, including its charging and discharging cycles and the best suited ways to charge/discharge it without exceed the limits imposed by their ability and by their chemical reactions responsible for the ability to store charge. Graphs will be analyzed corresponding to the charging cycles in order to understand how the battery will react to the entry/exit of the charge. These data can be used to optimize the use of the battery in order to increase its lifetime, which brings great advantages for the environment because there are several problems associated with its disposal when they reach the end of their useful life. This is indeed a major problem of the batteries, since the recycling of their composing material is extremely difficult to accomplish.

Keywords:

Electric battery, charge/discharge cycles, "state of charge"

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

Índice de Matérias

1	Introdução.....	1
1.1	Motivação	1
1.2	Tecnologias existentes.....	3
1.2.1	Teste convencional de descarga de baterias sobre cargas artificiais.....	3
1.2.2	Medição da resistência interna usando método AC.....	4
1.2.3	<i>Coup de fouet</i>	4
1.2.4	Integração da corrente	4
1.2.5	Usando baterias inteligentes	5
1.3	Descrição do problema.....	6
1.4	Metodologia seguida	7
1.5	Organização da dissertação.....	8
2	Estado da arte	11
2.1	Célula Galvânica	13
2.1.1	Descarga	14
2.1.2	Carga.....	18
2.2	Estrutura interna da bateria.....	20
2.2.1	Rectangulares	20
2.2.2	Cilíndricas.....	21
2.3	Capacidade	22
2.4	Taxa de descarga.....	24
2.5	Profundidade de descarga (<i>D.O.D</i>).....	24
2.6	Resistência interna.....	26
2.7	Estado de carga (<i>S.O.C</i>)	30
2.7.1	Utilizando a química	31
2.7.2	Medindo a tensão	31
2.7.3	Integrando a corrente	32
2.8	Razões que levam à diminuição da capacidade.....	32
2.9	Auto descarga	33
2.10	Associação de baterias	33
2.10.1	Baterias em paralelo	34

2.10.2	Baterias em série	36
2.10.3	Compostas (série paralelo)	37
3	Desenvolvimento de protótipo	39
3.1	Carregador de baterias do tipo SLA	42
3.1.1	Uso de PIC	44
3.1.2	Uso do UC3906	45
3.1.3	Construção de carregador Mk1	50
3.1.4	Construção do carregador Mk2	51
3.1.5	Alimentação do circuito carregador de baterias	52
3.1.6	Circuito de descarga de baterias	53
4	Resultados obtidos	57
4.1	Resultados obtidos com a descarga	57
4.2	Resultados obtidos durante a carga	60
4.3	Impacto da descarga profunda	60
4.4	Alteração das baterias do robot	63
5	Implementação	65
5.1	Descrição do sistema	65
6	Conclusões e trabalho futuro	69
7	Bibliografia	71

Índice de Figuras

Figura 2.1.1: Interior simplificado de uma célula.	13
Figura 2.1.2: Fluxo de electrões	17
Figura 2.2.1: Composição real interna da bateria rectangular.....	20
Figura 2.2.2: Corte de célula de bateria real cilíndrica	21
Figura 2.6.1: Esquema aproximado de uma bateria real em vazio	26
Figura 2.6.2: Esquema aproximado de uma bateria real em carga.....	27
Figura 2.10.1: Associação de baterias em paralelo.....	34
Figura 2.10.2: Circuito eléctrico equivalente de duas fontes em paralelo	35
Figura 2.10.3: Associação de baterias em série.....	36
Figura 2.10.4: Circuito eléctrico equivalente de duas fontes em série	36
Figura 2.10.5: Circuito eléctrico composto (série paralelo)	37
Figura 3.1.1: Diagrama de blocos simplificado do carregador de baterias	44
Figura 3.1.2: Transformador Buck, usando PIC	45
Figura 3.1.3: UC3906 num <i>dual level float charger</i> alterado	46
Figura 3.1.4: Representação dos diferentes patamares de carga disponíveis com a anterior configuração (fig 2.8)	48
Figura 3.1.5: Dimensionador de resistências para UC3906	49
Figura 3.1.6: Protótipo provisório do carregador de baterias	50
Figura 3.1.7: Desenho da versão final da placa	51
Figura 3.1.8: Construção da placa de circuito impresso.....	51
Figura 3.1.9: Versão final do carregador de baterias	52
Figura 3.1.10: Fonte de tensão com ligação série.....	52
Figura 3.1.11: Circuito de descarga das baterias	53
Figura 3.1.12: Diagrama eléctrico do novo circuito de descarga das baterias.....	54
Figura 3.1.13: Circuito real de descarga de baterias.....	54
Figura 3.1.14: Detalhe do circuito de descarga de baterias	55
Figura 5.1.1: Aspecto da aplicação da capacidade sobre a aplicação base ServRobot...	67
Figura 5.1.2: Diferentes patamares de carga	68

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

Índice de tabelas

Tabela 1:Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de testes às baterias.....	5
Tabela 2:Características das baterias	12
Tabela 3:Profundidade de descarga versus número de ciclos a 25°C (77°F) SLA [38]....	25
Tabela 4:Capacidade em função da corrente de descarga [34].....	59

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

Lista de Acrónimos

AC – Corrente Alternada (*Alternated Current*)

Banco – Conjunto de baterias conectadas entre si resultando numa bateria equivalente com características diferentes da bateria individual.

DC – Corrente Contínua (*Direct Current*)

D.O.D – Denominação para profundidade de descarga (*Depth of Discharge*)

H – Símbolo químico do elemento hidrogénio

i – Corrente [A]

Pb – Símbolo químico do elemento chumbo

pH – Potência de hidrogénio

SLA – Denominação para baterias de ácido–chumbo seladas (*Sealed Lead Acid*)

SO₄ – Sulfato

S.O.C – Quantidade de carga presente na bateria (*State Of Charge*)

S.O.H – Denominação de estado de conservação (*State of Health*)

Sulfatar – Processo de cobrir algo com sulfato (aspergir)

ϵ – Força Electromotriz [V]

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

1 Introdução

1.1 Motivação

O aquecimento global é uma das questões eminentes da actualidade que poderá diminuir com a redução da utilização de combustíveis fósseis. O próprio nome, fóssil, indica que estes demoram imenso tempo a formar. As reservas que agora consumimos foram formadas há cerca de 150 milhões de anos e estima-se que durem até 2051 no caso do petróleo, um pouco mais para o carvão e gás natural [1]. Este facto, aliado à poluição que a queima dos mesmos produz, tem agilizadado a procura por soluções e alternativas.

Como forma de combater esse consumo têm surgido medidas políticas especialmente destinadas à redução da dependência dos mesmos. Entre essas medidas encontra-se o estabelecimento de quotas de emissão de poluição [2], que são calculadas para cada país, mediante a sua dimensão, economia, desenvolvimento industrial, entre outros. Estas quotas são aplicadas aos países membros que, através da imposição de coimas aquando da sua transposição, tentam restringir as emissões de gases com efeito de estufa aos níveis previamente acordados. Os países que têm este tipo de acordo tentam cumprir com os níveis e fazem-no através do apoio à produção de energia eléctrica com base nas energias renováveis (tais como as hídricas, eólicas, solares, entre outras) e através da imposição de melhorias na eficiência das centrais termoeléctricas já existentes, porque a produção de energia eléctrica através da queima de combustíveis fósseis nas centrais termoeléctricas clássicas é um processo pouco eficiente e resulta na emissão de elevados níveis de gases para a atmosfera.

Em resposta ao fraco desempenho das centrais termoeléctricas clássicas e às exigências das quotas surgem então as centrais termoeléctricas de ciclo combinado que, embora mais complexas, trazem grandes vantagens em termos de eficiência, tendo um rendimento bastante superior, o que permite ter os mesmos níveis de produção eléctrica com menores emissões de poluentes [3] [4] [5].

Outra fatia importante no consumo de combustíveis fósseis deve-se aos motores de combustão interna presentes nos automóveis. Surgiram também medidas que visam a diminuição de circulação dos mesmos através de ajuda financeira na troca de veículos antigos por modelos mais recentes e portanto mais eficientes e “amigos do ambiente”. Esta ajuda financeira tem um peso ainda maior caso a troca seja feita para veículos de locomoção totalmente eléctrica, pois estes últimos são os que proporcionam deslocações com a menor pegada ambiental [6] [7]. Devido a um conjunto de circunstâncias tais como, as ajudas oferecidas pelos governos, à obrigação de repensar os gastos, e ao design cada vez mais inovador e apelativo dos automóveis eléctricos, tem-se conseguido mudar as mentalidades dos condutores fazendo com que estes passem a dar primazia ao consumo face à potência dos seus automóveis o que, por sua vez, tem levado ao crescimento do mercado associado aos veículos híbridos ou totalmente eléctricos.

Nos automóveis (de combustão interna, híbridos, ou totalmente eléctricos) alia-se a mobilidade à necessidade de energia eléctrica. Surge portanto a necessidade de possuir a bordo um dispositivo, capaz de acumular energia eléctrica, para que esta possa ser utilizada para alimentar os diversos componentes presentes no veículo. Este dispositivo é a bateria. Esta é dimensionada de acordo com as necessidades específicas de cada veículo, pois no caso dos veículos de combustão interna esta é utilizada para dar arranque ao motor de combustão (que posteriormente é responsável pela locomoção do veículo e recarga da bateria) enquanto que nos veículos eléctricos a bateria tem de armazenar mais energia pois alimenta todo o automóvel incluindo o(s) motor(es) eléctrico(s) que promovem a deslocação do veículo. Como as exigências feitas à bateria variam de acordo com o tipo de veículo existe a necessidade de adaptar a bateria à função que esta desempenha. Desta forma existem baterias que, devido às suas diferentes características internas, se tornam mais indicadas para determinados veículos. Como os veículos de combustão são menos exigentes com a sua bateria opta-se por equipar os mesmos com uma bateria de ácido-chumbo que, face à de iões de lítio utilizada nos híbridos e eléctricos, tem uma menor densidade de energia, um ciclo de vida menor, demora mais tempo a carregar mas que é em média quatro vezes mais barata que a de iões de lítio. Já nos automóveis híbridos e totalmente eléctricos há a necessidade de uma bateria que ofereça uma grande capacidade de armazenamento de energia, portanto o volume e o peso da mesma passam a ser factores a considerar. Desta forma os fabricantes destes veículos equipam os mesmos com baterias de iões de lítio minimizando assim o espaço ocupado pela bateria bem como o peso da mesma, o que se traduz num maior conforto e autonomia à custa porém de um preço mais elevado.

A bateria é então uma peça fundamental no ramo automóvel, tendo ainda maior peso nos veículos totalmente eléctricos. Como tal, estes dependem em muito da tecnologia e estado de conservação das baterias, que, aos dias de hoje é uma das principais limitações ao crescimento do mercado de automóveis eléctricos pois a sua capacidade tem impacto directo na autonomia dos veículos. Os automóveis eléctricos demoram, tipicamente, horas [8] a efectuar uma carga, o que comparando com os 10 minutos que se demora a atestar um automóvel com um combustível fóssil, é uma enorme desvantagem, além de que, muitos países não têm ainda uma rede de abastecimento direccionada aos veículos eléctricos, tão completa como a dos fornecedores de combustíveis fósseis.

Existem em curso projectos [9][10][11] que visam a diminuição do tempo de carga da bateria, bem como um aumento da sua capacidade [12], no entanto, até aos dias de hoje, essa redução implica também uma redução do tempo de vida da mesma, isto porque esse tipo de carga rápida recorre normalmente a níveis de corrente superiores aos normalmente usados nas cargas ditas lentas o que tendencialmente leva a um maior aquecimento e desgaste das baterias. O caminho para se conseguir diminuir o tempo de carga das baterias passa pelo desenvolvimento de técnicas que permitam à bateria absorver energia a ritmos superiores dentro do seu normal ciclo de funcionamento. Sabendo que os ritmos de carga das baterias

hoje existentes são ainda “lentos” face à alternativa de combustão e tendo em conta que a bateria é um dos componentes mais caros do veículo, torna-se então importante que esta seja devidamente carregada de forma a prolongar ao máximo a sua vida útil reduzindo desta forma os custos de operação deste tipo de veículos, que, aliando à inferior pegada ecológica resulta nas principais vantagens face aos veículos de combustão. Importa também referir que as baterias são componentes químicos e portanto a sua eliminação em final de vida, é por si só um processo delicado e, em alguns casos, nocivo para o ambiente.

Para otimizar o ciclo de vida das baterias surge assim a necessidade de saber, em cada instante, o nível de energia disponível na bateria e com isso garantir que as cargas e descargas da mesma são sempre efectuadas dentro da sua zona óptima de funcionamento. Através do conhecimento do nível de energia disponível na bateria, torna-se então possível a criação de alarmes indicativos dos diversos estados de carga que a bateria vai apresentando, podendo deste modo avisar o utilizador quando esta se encontra quase descarregada, à semelhança do que acontece nos automóveis movidos a combustíveis fósseis que habitualmente dão um sinal visual e sonoro indicativo de que a quantidade de combustível está perigosamente baixa. Com estes avisos pretende-se que o utilizador tenha presente a informação do nível de carga podendo assim evitar as descargas profundas (2.5) onde a bateria é descarregada para além do ponto de carga mínima indicado pelo fabricante e que têm consequências na duração útil da bateria.

1.2 Tecnologias existentes

É cada vez mais importante saber em que estados de conservação (*State-of-Health*, *S.O.H*) [13] e carga (*State-of-charge*, *S.O.C*) [14] [15] se encontra a bateria de forma a garantir que a mesma se encontra sempre nas melhores condições para cumprir a sua função [16]. Como tal foram desenvolvidos vários métodos ao longo dos anos tendo todos a mesma finalidade sendo portanto escolhidos de acordo com os requisitos da aplicação em causa.

As testes existentes serão descritos começando pelos mais simples, intrusivos e demorados e que obrigam à interrupção do funcionamento do circuito, terminando com modernos testes onde é necessário que o sistema tenha uma maior complexidade mas que torna o teste mais subtil e portanto imperceptível ao restante circuito não interrompendo o normal funcionamento do mesmo.

1.2.1 Teste convencional de descarga de baterias sobre cargas artificiais

Este é um teste extremamente intrusivo pois exige que o circuito a jusante seja desligado, ou que, durante o teste exista uma forma alternativa de alimentar o mesmo. Isto acontece porque as baterias em teste necessitam de ser desconectadas do habitual circuito

passando a estar conectadas a cargas artificiais. Deste modo é necessário retirar ligações existentes e efectuar novas o que só por si pode, em alguns casos, dar azo à ocorrência de descuidos com as ligações e respectivos danos nas baterias.

Estas cargas são simples reóstatos que são usados de forma a proporcionarem uma taxa de descarga controlada permitindo assim ao operador retirar dados relativos ao comportamento do banco de baterias ao longo da descarga e dessa forma chegar a conclusões sobre o estado das mesmas. Existe no mercado um sistema que agiliza este processo tirando ao operador o trabalho do acompanhamento do andamento da descarga e as respectivas conclusões sobre o estado das baterias [17]. Em alguns casos, onde as baterias estão minimamente afectadas, este sistema possibilita cargas numa forma específica numa tentativa de recuperar algumas das características iniciais das baterias.

1.2.2 Medição da resistência interna usando método AC

Este método também exige que a bateria seja desacoplada do circuito e foi bastante utilizado para medir o valor da resistência interna da bateria. Este teste, conduzido a 1 kHz, permite detectar defeitos críticos tais como células em curto-circuito. No entanto há outros defeitos que se limitam a afectar a capacidade da célula mantendo a funcionalidade da mesma e que portanto não são detectados por este método que sofre desta limitação [18]. Este teste não permite uma análise quantitativa da capacidade da bateria, devolvendo somente o valor da resistência dos electrodos e do electrólito porque é onde a frequência de 1 kHz influi. Para se saber a restante informação sobre o estado da bateria é necessário um teste multifrequências [19]. À semelhança do método anterior, também existem no mercado dispositivos desenhados para fazer este tipo de testes à bateria [20].

1.2.3 Coup de fouet

Este é um método relativamente recente (2000) e que se baseia na medição da queda da tensão da bateria nos primeiros instantes em que a carga é conectada à bateria e se inicia a descarga para avaliar o *S.O.H* da bateria. Ao longo desta dissertação serão apresentados diversos gráficos onde é possível verificar a queda de tensão que este método analisa [21].

1.2.4 Integração da corrente

Este método, também conhecido por contagem de coulombs, faz isso mesmo, ou seja, vai integrando a corrente que a bateria vai fornecendo ao circuito. No final da descarga, o valor obtido deve ser comparado com o indicado pelo fabricante da mesma que torna assim possível ter uma ideia do estado de conservação da bateria.

1.2.5 Usando baterias inteligentes

Este método é baseado no uso de baterias que trazem incorporado um chip com memória interna onde fica gravado o histórico dos ciclos já efectuados. Neste histórico tem-se informação sobre o número de ciclos que a bateria realizou bem como de outros factores tais como os intervalos de tempo durante os quais a bateria foi submetida a um uso fora dos seus parâmetros normais de funcionamento. Com estes dados, que podem facilmente ser descarregados, torna-se possível calcular em que estado de conservação é que as baterias se encontram [22].

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de testes às baterias

Teste	Vantagens	Desvantagens
1.2.1	<ul style="list-style-type: none">- Simplicidade do circuito base- Avalia o <i>S.O.H</i>	<ul style="list-style-type: none">- Duração (mínima de 4 horas)- Desconexão e Conexão de cabos (intrusivo)- Tempo de recarga indisponibiliza as baterias para uma eventual falha de energia da fonte principal- Custo de equipamentos e mão-de-obra especializada, equipamento alternativo ao banco em teste
1.2.2	<ul style="list-style-type: none">- Simplicidade do circuito base- Mais rápido que o método 1.2.1- Pode avaliar <i>S.O.C</i> e <i>S.O.H</i>	<ul style="list-style-type: none">- Desconexão e Conexão de cabos- Custo de equipamentos e mão-de-obra especializada, equipamento alternativo ao banco em teste- Devolve poucos dados (impreciso)
1.2.3	<ul style="list-style-type: none">- Simplicidade do circuito base- Avalia o <i>S.O.H</i>- Não intrusivo	<ul style="list-style-type: none">- Realizado no início da descarga e portanto não avalia o <i>S.O.C</i>- Custo de mão-de-obra especializada
1.2.4	<ul style="list-style-type: none">- Livre de mão-de-obra- Não intrusivo- Pode avaliar <i>S.O.C</i> e <i>S.O.H</i>	<ul style="list-style-type: none">- Custo inicial- Circuito mais complexo
1.2.5	<ul style="list-style-type: none">- Evita equipamentos externos- Não intrusivo- Pode avaliar <i>S.O.C</i> e <i>S.O.H</i>	<ul style="list-style-type: none">- Complexidade e custo das baterias- Custo de mão-de-obra especializada- Só disponível em alguns tipos de baterias

Estes são os testes mais utilizados para obtenção de informação sobre o estado das baterias. Com este trabalho pretende-se criar um sistema que, à semelhança destes, adquira informação sobre o estado de carga e de conservação da bateria de ácido-chumbo e que não seja intrusivo, pois a aplicação onde este se insere assim o obriga. Desta forma o método 1.2.1, tal como o 1.2.2 não serve o propósito, pois ambos são intrusivos. Da mesma forma também o método 1.2.3 não serve pois só devolve o *S.O.H*, não devolvendo qualquer

informação sobre o *S.O.C* que é um dos requisitos para o método que se pretende criar/usar. Este método podia no entanto ser utilizado em conjunto com outro que fornecesse o *S.O.C*, no entanto este é bastante limitativo pois só incide no momento inicial da descarga. Já os dois últimos métodos (1.2.4 e 1.2.5) devolvem todos os dados necessários para que se possa calcular os parâmetros de *S.O.C* e de *S.O.H*. No entanto, as baterias aqui em estudo são as clássicas *SLA* (*Sealed Lead Acid*) que não guardam registo algum, portanto os dados serão obtidos duma forma externa à bateria.

Com este trabalho pretende-se implementar um sistema que execute um teste às características da bateria. Este teste deverá ser autónomo e exclusivo às baterias de ácido-chumbo porque, como as características internas das baterias variam de acordo com os materiais constituintes torna-se necessário adequar os testes ao tipo das baterias em estudo. Há no mercado alguns sistemas que testam a bateria de ácido-chumbo e que desempenham uma função idêntica à que aqui se pretende no entanto, estes necessitam de desacoplar a bateria da carga durante o teste que é algo que é indesejável neste caso pois dessa forma estaremos a interromper o fornecimento de energia à carga [17].

1.3 Descrição do problema

Para se obter informação sobre a quantidade de energia restante nas baterias é imperativo saber como estas se comportam durante a sua carga e descarga. Desta forma torna-se então necessário perceber as alterações que as características internas das baterias sofrem consoante a quantidade de carga que têm armazenada e deste modo traçar as curvas de carga e descarga. Com estas curvas torna-se possível a construção de um modelo da bateria através do qual se pretende estimar a carga que a bateria contém e, juntando o conhecimento de outros parâmetros, calcular qual o tempo de carga ainda restante. Este modelo será constituído por um sistema que vai acumulando um histórico das anteriores cargas e descargas e que, de acordo com essa informação anteriormente recolhida, tentará perceber em que ponto das curvas se encontra em cada instante e, dessa forma, calcular então o estado de carga da bateria. Este sistema deverá também estimar o comportamento dos ciclos actuais e identificar se estes estão, ou não, de acordo com o esperado. Desta forma pretende-se usar o passado para prever o futuro, esperando assim obter informação sobre os parâmetros da bateria.

O caso aqui em estudo para testes e demonstração é um veículo eléctrico autónomo (robot) [23] que, contrariamente aos veículos eléctricos de passageiros actualmente comercializados, é alimentado recorrendo a baterias de ácido chumbo seladas (*SLA*). Assim pretende-se que este adquira conhecimento sobre as baterias para que duma forma autónoma possa gerar um conjunto de alarmística que, de acordo com *thresholds* previamente definidos, vá gerando alarmes indicativos da quantidade de energia disponível e de qual a sua autonomia estimada. Pretende-se também usar esse sistema para identificar quais os impactos das

descargas que ultrapassem o valor de carga mínimo indicado pelo fabricante, (descargas profundas) através da comparação das características de baterias sujeitas a esse uso excessivo face a conjuntos de baterias que sejam sempre correctamente descarregados.

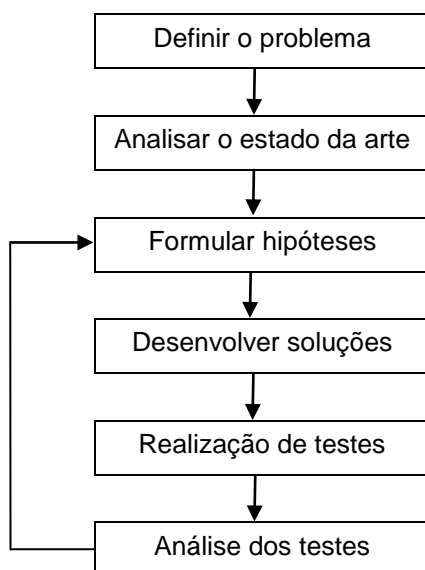
Devido a toda esta necessidade de informação quanto ao nível de energia disponível surge então esta dissertação de mestrado que tem por objectivo a criação de um modelo adaptativo e preditivo da quantidade de carga presente na bateria.

Este estudo foi feito na Holos S.A. com base num veículo eléctrico autónomo que daqui em diante passarei a denominar por robot. Este robot é uma unidade eléctrica móvel que tem como fonte energética um banco de baterias do tipo *SLA*, ácido-chumbo seladas.

Existe uma estação de carga (base) que tem como função receber o robot que, de uma forma autónoma, se estaciona sobre esta e recebe a energia que esta lhe transmite duma forma que permite a ausência de fios entre estes. Após receber a carga o robot poderá então abandonar a base e continuar a sua missão até que os níveis de energia voltem a ficar baixos e este tenha a necessidade de retornar à base para uma nova recarga. Este é então o objectivo a atingir, sendo que esta dissertação visa a gestão e análise da energia que o robot recebe, garantindo que esta chega às baterias e que, durante a missão, este consiga fazer uma estimativa da quantidade de energia que ainda tem disponível de forma a poder calcular a sua autonomia e evitar ficar parado com falta de energia.

1.4 Metodologia seguida

Neste subcapítulo dá-se a conhecer a metodologia que foi seguida ao longo desta dissertação. Seguindo o método introduzido por Descartes e posteriormente complementado por Sir Isaac Newton, pretende-se usar o método científico decompondo o problema em pequenas partes mais simples [24].



Numa fase inicial começa-se por definir o problema dum ponto de vista teórico. Foi necessário fazer uma pesquisa e selecção de informação relevante (estado da arte), de forma a conhecer as razões que levam a que este aconteça e quais as respectivas alternativas/soluções actuais.

Seguidamente formulam-se hipóteses de resolução do problema e são desenvolvidas soluções para o mesmo. O passo seguinte é realizar testes que comprovem, ou excluam, a hipótese anteriormente apresentada.

Analisando os dados obtidos com os testes efectuados pretende-se validar, ou não, as soluções encontradas e daí retirar as devidas conclusões que podem servir de base à formulação de novas hipóteses.

1.5 Organização da dissertação

A estrutura base desta dissertação é composta por seis capítulos:

O presente capítulo encontra-se dividido em vários subcapítulos. No primeiro é apresentada uma introdução ao problema, enquanto que no segundo surge um pequeno resumo do estado da arte. O terceiro é uma descrição do problema específico aqui em estudo enquanto que o quarto contém a metodologia seguida ao longo da dissertação. O quinto é este mesmo subcapítulo e contém um breve índice descritivo da forma como esta dissertação se encontra organizada

O capítulo 2 apresenta uma breve análise ao estado da arte onde se descreve a evolução dos acumuladores de energia, nomeadamente das baterias electroquímicas. Com este capítulo pretende-se realçar a importância das baterias no nosso quotidiano, e as vantagens que advêm da sua correcta utilização. Ao longo deste capítulo são também explicados alguns conceitos chave associados às baterias bem como uma análise aos métodos utilizados para calcular o estado de carga e de saúde das baterias.

O capítulo 3 apresenta o circuito eléctrico do robot e as alterações sugeridas para o mesmo com vista a que este consiga permanecer ligado enquanto efectua a carga do seu banco de baterias. Este capítulo contém também uma descrição dos equipamentos que foram propositadamente construídos para possibilitar e agilizar o estudo das baterias quando sujeitas a condições possivelmente adversas.

É sabido que as características das baterias variam consoante o número de ciclos de carga e descarga e a qualidade com que estes são efectuados. Portanto ao longo do capítulo 4 serão apresentados os resultados obtidos ao longo de vários ciclos de carga e descarga que foram realizados de modo a perceber qual o seu impacto na bateria. Para perceber como a qualidade dos ciclos influencia a vida útil da bateria serão efectuadas descargas profundas

num diferente conjunto de baterias de forma a que os dados assim obtidos possam ser comparados aos obtidos nos conjuntos correctamente descarregados.

No capítulo 5 é apresentado o software construído para o cálculo da autonomia do robot sendo também apresentados os resultados experimentais da aplicação desse mesmo software ao robot.

Finalmente no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e o trabalho que no futuro poderá ser desenvolvido neste mesmo campo.

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

2 Estado da arte

As baterias, como hoje as conhecemos, derivam de uma experiência realizada em 1800 pelo físico italiano Alessandro Volta na qual foi construída a primeira pilha. Este percebeu que ao adicionar um líquido a certos tipos de metais estes produziam uma pequena tensão, pelo que, de forma a demonstrar esse facto colocou um pedaço de papel embebido em água salgada entre duas placas de metal, sendo que uma era de cobre e a outra de zinco e aos terminais destes juntou condutores eléctricos por onde a corrente fluiu [25]. O nome de pilha derivou do facto deste dispositivo ter sido construído através do empilhamento de várias placas [26]. Volta percebeu que esta sandwiche de placas metálicas e papel, hoje denominada por célula, pode ser montada em série com outras do mesmo tipo aumentando dessa forma a tensão disponível aos seus terminais. Esta descoberta foi de tal forma importante que ainda hoje as baterias/pilhas que utilizamos assentam nestes princípios, existindo somente uma alteração de materiais de forma a conseguir uma melhor eficiência aumentando a sua capacidade com um menor tamanho [27]. É também devido a esta experiência que hoje usamos a unidade volt como unidade padrão para a tensão eléctrica em homenagem ao seu apelido Volta.

Em 1836, o químico e físico inglês John Daniell fez alterações à pilha voltaica tendo mergulhado cada um dos diferentes metais (electrodos) em diferentes líquidos (electrólitos) ligando estes através duma ponte salina. O electrodo de cobre estava mergulhado numa solução de sulfato de cobre (CuSO_4), enquanto que, o electrodo de zinco estava mergulhado numa solução de sulfato de zinco (ZnSO_4). A ponte salina que unia os diferentes recipientes era composta por um tupo em U invertido contendo no seu interior uma solução aquosa de um sal bastante solúvel sendo as pontas do U cobertas com algodão. De forma a tornar visível o fluxo de corrente eléctrica Daniell ligou uma lâmpada aos electrodos usando condutores eléctricos [28] [29].

Esta pilha denominada por Pilha de Daniell, tinha um comportamento bastante estável na qual era inclusivamente possível verificar a alteração de tamanho dos electrodos, pois devido às reacções químicas, enquanto que o electrodo de Zinco se ia corroendo e diminuindo a sua massa, o electrodo de cobre ia aumentando, este facto servia como indicação de qual a “capacidade restante”.

Foi em 1859 que Gaston Planté inventou a bateria de ácido-chumbo [30] sendo que esta é ainda hoje, graças às sucessivas actualizações e modificações, uma das baterias mais confiáveis do mercado. Uma outra característica que as torna tão disseminadas advém do facto de que estas são relativamente fáceis de construir e portanto apresentam um baixo custo face à sua elevada capacidade. Todas essas características fizeram com que esta bateria tenha sido adequada às mais diferentes aplicações através de pequenas alterações na sua estrutura, tendo surgido diversos tipos de baterias assentes na bateria de ácido-chumbo. No grupo das baterias de ácido-chumbo encontram-se as baterias dos tipos, seladas, reguladas por válvulas,

ciclo profundo, entre outras que, com pequenas alterações estruturais, se tornam mais indicadas à aplicação que destas depende.

As baterias estão directamente associadas à portabilidade de equipamentos eléctricos e portanto estão disseminadas por todo o tipo de aplicações tais como comandos, telemóveis, computadores, ferramentas e mais recentemente nos automóveis eléctricos devido às preocupações ambientais

Existem vários tipos de baterias no mercado, cada um com as suas vantagens e desvantagens, que devem ser seleccionadas mediante as especificações do projecto específico. Na seguinte tabela apresentam-se as características típicas e os parâmetros em que influem.

Tabela 2:Características das baterias

Características	Unidade	Parâmetro
Energia Especifica	Wh/Kg	Autonomia
Densidade de Energia	Wh/Litro	Espaço/Volume
Potência específica	W/kg	Desempenho
Ciclo de vida	% de recargas	Durabilidade
Tempo de recarga	Horas ou minutos	Praticabilidade
Resistência Interna	Ω	Qualidade

As características aqui indicadas são indicativas do comportamento da bateria, pelo que, no momento da escolha da bateria para uma determinada aplicação, se deve fazer uma selecção das características que mais importam na aplicação em causa e, se necessário, fazer um *trade-off* entre algumas delas prejudicando certos parâmetros em função de um melhor comportamento nos parâmetros de maior peso na aplicação.

A energia específica relaciona a capacidade da bateria com o seu peso, o que, se pode relacionar como tendo um maior impacto na autonomia caso a aplicação use a energia das baterias para a locomoção. A densidade de energia é uma característica importante quando o espaço para a bateria é limitado, pois relaciona a capacidade da mesma com o volume que esta ocupa. A potência específica indica a potência que aquele tipo de bateria fornece por quilograma. O número de recargas é a duração útil estimada da bateria e é indicado pelo ciclo de vida, esta característica é particularmente importante nos casos onde a bateria é um componente caro relativamente à aplicação onde se encontra inserida. O tempo de recarga indica o tempo que é necessário para que a bateria receba uma carga completa. Esta característica é particularmente importante em aplicações onde é necessário estar sempre a postos e portanto o utilizador deve, com este conhecimento, o número de baterias necessárias

para garantir que enquanto umas carregam tem outras a postos para garantir a energia à aplicação em questão. A resistência interna é uma característica que irá ser estudada mais à frente e é indicativa da qualidade da bateria.

Todos estes parâmetros são directamente proporcionais às características, exceptuando o volume e a resistência, porque quanto mais densa for, menos material necessita para que o resultado final seja uma bateria equivalente com um volume menor e porque a bateria é tanto melhor quanto menor for a sua resistência interna. De notar que todos estes parâmetros vão sofrendo alterações ao longo da vida e degradação da bateria, sendo que a resistência altera de acordo com variáveis tais como a quantidade de carga presente na mesma, a temperatura, a idade, entre outras.

Como referido, a bateria é composta por um conjunto de células onde cada uma dá o seu contributo para que, no final, se obtenha a tensão desejada. Portanto para melhor compreender como a bateria funciona basta que se perceba como funciona uma das células sendo que as restantes têm um comportamento equivalente.

2.1 Célula Galvânica

Na Figura 2.1.1 apresenta-se o desenho do interior simplificado de uma célula galvânica.

*Fonte: <http://munin.pt/prov/bateria.html>

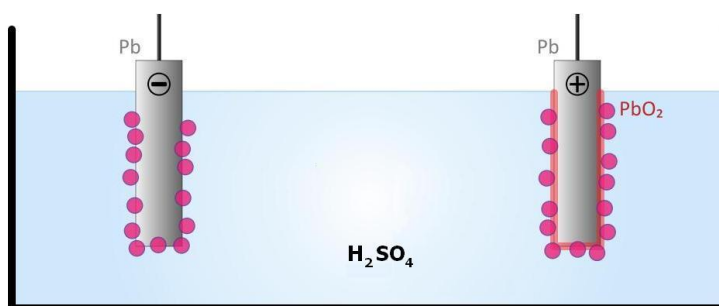


Figura 2.1.1: Interior simplificado de uma célula.

No caso real as placas têm uma forma um pouco mais complexa que permite maximizar a sua área de contacto com a solução electrolítica, o que leva a um aumento da capacidade da bateria.

O interior da célula é composto por um conjunto de placas de chumbo (Pb) e dióxido de chumbo (PbO₂), às quais se chamam electrodos. Estes estão imersos numa solução electrolítica, doravante denominada por electrólito, e que é composto por 35% de ácido sulfúrico e 65% de água, sendo que esta concentração varia ao longo do ciclo de carga.

Sabendo que a bateria é somente um dispositivo que armazena energia então este tem de ser carregado para que depois possa fornecer essa mesma energia. Esta característica que possibilita a carga e descarga da bateria tem como origem uma reacção química que tem a

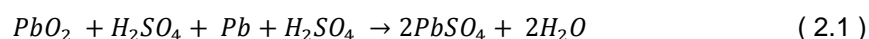
particularidade de ser reversível, isto é, durante a descarga esta processa-se num sentido enquanto que, na carga ocorre a reacção inversa.

A corrente eléctrica é um fluxo ordenado de partículas portadoras de carga eléctrica, e nas baterias a origem desta corrente é uma reacção química do tipo redução-oxidação (redox), onde ocorre a transferência de electrões. Neste tipo de reacções existe um elemento que é o redutor, que cede electrões, e outro que é o oxidante e os capta. Desta forma, ao ceder electrões, o redutor converte-se em oxidado enquanto que, o oxidante passa a ser o agente reduzido.

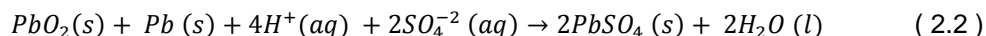
De forma a oferecer uma melhor compreensão desta reacção apresentam-se os seguintes fenómenos que ocorrem na célula e que permitem que esta liberte a carga previamente acumulada, apresentando-se de seguida o processo de carga da mesma.

2.1.1 Descarga

A equação que descreve o processo de descarga da célula é a seguinte [30]:



organizando e adicionando informação sobre os estados físicos sai:

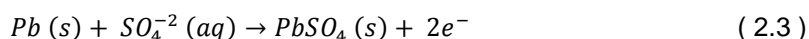


As equações mostram que ao mergulhar dois electrodos, sendo um de chumbo e um de dióxido de chumbo numa solução de ácido sulfúrico, resultam duas moléculas de água e outras duas de sulfato de chumbo.

Como desta reacção resultam água e sulfato de chumbo, a concentração de ácido sulfúrico no electrólito vai diminuindo enquanto que em paralelo ocorre um outro processo que vai sulfatar os electrodos impedindo o contacto directo entre estes e o electrólito. Estes são então os processos responsáveis pela descarga da bateria, pois os reagentes vão tendo cada vez mais dificuldade em se agruparem devido à alteração na concentração dos mesmos no electrólito e à crescente diminuição da sua área de contacto.

Estando a reacção global de descarga descrita vamos agora incidir no que ocorre simultaneamente ao nível dos electrodos.

No electrodo negativo (ânodo) tem-se a seguinte reacção:



O electrodo negativo, composto de chumbo, reage com o electrólito formando sulfato de chumbo, libertando dois electrões. Introduzindo o conceito de número de oxidação torna-se fácil perceber a origem destes dois electrões. Como tal seguem-se as regras básicas de como determinar o número de oxidação.

Regras básicas para a determinação do número de oxidação:

1. O número de oxidação de um elemento no estado livre (quando não está combinado) é igual a zero;
2. Quando se encontra combinado o número de oxidação do hidrogénio é sempre +1 (salvo nos hidretos metálicos em que toma o valor -1).
3. No caso do oxigénio o número de oxidação é -2, à excepção dos peróxidos em que é igual a -1 e dos superóxidos onde é igual a -0,5. Quando ligado ao flúor, dado que este é mais electronegativo que o oxigénio, será o fluor que apresenta número de oxidação -1.
4. Os iões monoatómicos têm o número de oxidação igual à sua própria carga;
5. A soma dos números de oxidação de todos os átomos que constituem uma molécula tem de ser igual a zero
6. A soma dos números de oxidação de todos os átomos de um ião poliatómico é sempre igual à carga do ião. [31]

Existem casos onde estas regras não se verificam, não sendo no entanto o caso das reacções aqui estudadas, como tal optou-se por não fazer referência a esse tipo de casos.

Com estas breves regras consegue-se então determinar os números de oxidação dos elementos presentes nas reacções que ocorrem durante a carga e descarga da célula electroquímica.

Observando que o chumbo (Pb) aparece nesta reacção (2.3) como um átomo neutro livre, pela primeira regra, o seu número de oxidação é zero. Seguindo agora para o sulfato (SO_4^{-2}) observa-se imediatamente a indicação que o $nox(SO_4) = -2$. Como tal, vamos calcular os números de oxidação do oxigénio e do enxofre sabendo que no final a carga iónica será -2. Começando pelo oxigénio, pelo uso da segunda regra sabe-se que o $nox(O) = -2$. Uma vez que a molécula contém quatro átomos de oxigénio resulta que no total o $nox(O_4) = -8$, portanto para resultar no final um $nox(SO_4) = -2$ o enxofre terá de ter um $nox(S) = 6$.

$$nox(S) + 4 \times nox(O) = nox(SO_4) \quad (2.4)$$

$$6 + 4 \times (-2) = -2$$

Tendo os números de oxidação do lado esquerdo da reacção calculados irá ser demonstrado o cálculo dos do lado direito, de modo a verificar a real origem dos electrões responsáveis pelo fornecimento da corrente eléctrica.

Como resultado final do lado esquerdo da reacção é -2, também o resultado final do lado direito da reacção o deverá ser. Começando pelo sulfato de chumbo (PbSO_4) e sabendo que o $\text{nox}(\text{S}) = 6$ e $\text{nox}(\text{O}_4) = -8$, anteriormente calculados, sai que $\text{nox}(\text{Pb}) = +2$. Isto usando a quinta regra que indica que a molécula PbSO_4 deve o seu número de oxidação igual a zero.

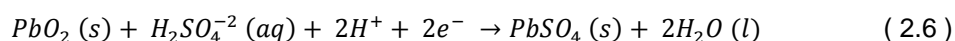
Para concluir temos do lado esquerdo da equação -2 e do lado direito 0, o que não pode acontecer. De forma a igualar a carga de ambos os lados da reacção adicionam-se dois electrões ao lado direito. Estes electrões têm origem no chumbo que inicialmente era Pb e que através da união com o sulfato ficou Pb^{2+} , ou seja, sofreu oxidação tornando-se o agente redutor da reacção. Desta forma o ânodo fica então com carga negativa devido à reacção que se acabou de demonstrar e que tem como resultado a libertação de electrões que formam a corrente eléctrica.

Esta foi (2.5) então a reacção iónica que aconteceu no ânodo:



Fazendo uso de uma tabela de potenciais redox [32] percebe-se que o potencial de equilíbrio é na ordem de -0,13 V. Portanto o electrodo assume potencial negativo de valor -0,13 V devido a esta reacção. De notar que este é um valor aproximado que depende da temperatura, pressão entre outros factores sendo dessa forma possível encontrar valores que diferem dos aqui enunciados.

Já no electrodo positivo (cátodo) tem-se:



No electrodo positivo o dióxido de chumbo, do qual é composto, reage com o electrólito no qual está mergulhado, de notar que no electrólito estão os dois átomos de hidrogénio libertados na anterior reacção aquando da separação do H_2SO_4 , e que no electrodo aparecem os dois electrões também eles libertados pela reacção que aconteceu no ânodo, mas que fluíram através do circuito que a bateria está a alimentar. Esta reacção, à semelhança da anterior, forma sulfato de chumbo que fica agarrado aos electrodos e água que ao ficar no electrólito vai diminuindo a concentração de ácido presente no mesmo.

Para se perceber o que aqui acontece será novamente utilizada a análise dos números de oxidação, à semelhança do caso anterior. Como a molécula de PbO_2 tem $\text{nox}(\text{PbO}_2) = 0$ e

sabendo que o $\text{nox}(\text{O}_2) = -4$ sai que o chumbo tem 4 como seu número de oxidação. O hidrogénio tem número de oxidação igual a 1 portanto, como são quatro, resulta +4. O número de oxidação do SO_4 está indicado (-2) e os dois electrões libertados pela reacção de descarga no ânodo entram aqui com carga -2, pelo que a carga positiva dos quatro hidrogénios se vai anular com a carga negativa do sulfato e dos dois electrões. Como resultado final temos do lado esquerdo da reacção um total de cargas neutro, que também se verifica do lado direito pois o chumbo presente no sulfato de chumbo tem $\text{nox}(\text{Pb}) = 2$, tendo sido este o reduzido pois recebeu electrões tendo passado de um nox de 4 para 2, como aqui foi demonstrado.



Mais uma vez, fazendo uso da tabela de potenciais redox sai que o electrodo positivo será o cátodo pois este assume potencial na ordem de 1,69 V, que é o potencial de equilíbrio desta reacção de ionização [32].

Como resultado de ambas as reacções de ionização resulta uma diferença de potencial entre os electrodos dos terminais da célula que ronda os 2 V anteriormente referidos e que são deste modo justificados.

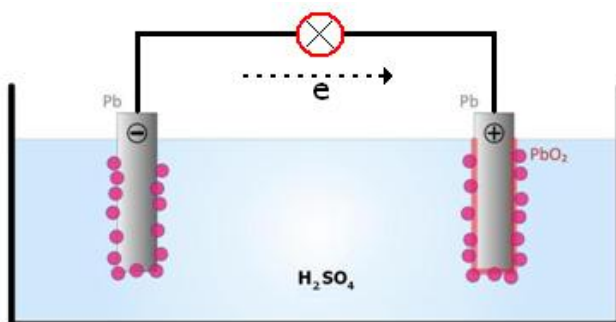


Figura 2.1.2: Fluxo de electrões

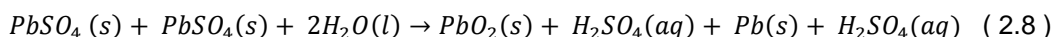
Como se acabou de demonstrar os electrões que abandonam o chumbo saem do electrodo negativo (Pb), atravessam o circuito ao qual a bateria se encontra conectada e chegam ao electrodo positivo (PbO_2) onde se agrupam.

O processo até aqui descrito acontece durante a descarga. Como se irá ver de seguida durante a carga acontece o processo inverso

2.1.2 Carga

Sabendo que o sulfato de chumbo é insolúvel no electrólito e que este vai-se fixando à superfície dos electrodos durante a descarga da célula, consegue-se perceber que, devido a não haver perda de reagentes, a reacção química que ocorre no interior da célula é reversível. Como tal, o processo de carga é descrito usando a mesma equação da descarga, mas desta vez no sentido inverso. Esta característica que permite que a bateria tenha um comportamento cíclico, ficando desta forma novamente operacional após a sua carga, é então a razão pela grande popularidade da mesma.

Esta é a reacção que ocorre no interior das células durante a carga da bateria (2.8).



A equação acima descrita não se encontra apresentada da forma mais correcta, uma vez que os mesmos compostos se deveriam encontrar agrupados. Porém, neste caso, esta apresentação facilitará a sua compreensão/percepção.

A equação descreve uma fase inicial onde existem dois electrodos sulfatados, mergulhados em água e que, de seguida, se reorganizam transformando-se em dióxido de chumbo, chumbo e ácido sulfúrico. Ou seja, a célula repõe desta forma as condições iniciais, em que o enxofre ao invés de estar nos electrodos está no electrólito. Relembrando o anterior processo de descarga onde um dos produtos da reacção era água e esta ia diminuindo a concentração do electrólito à medida que a bateria ia descarregando, é agora possível ver o processo inverso a ocorrer, onde a água serve como reagente numa reacção onde como produto se tem ácido sulfúrico.

Continuando a anterior abordagem explicam-se de seguida os processos químicos que acontecem no cátodo e ânodo durante o processo de carga.

Reacção presente no electrodo negativo durante a carga da bateria (2.9).

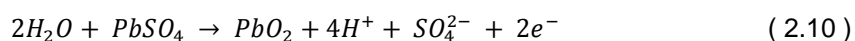


O electrodo de chumbo, que se encontra nesta fase com a sua superfície sulfatada derivado ao anterior processo de descarga, recebe dois electrões que, como resultado, libertam o sulfato das paredes do electrodo, deixando assim o sulfato livre para se combinar com o hidrogénio presente no electrólito e formar novamente ácido sulfúrico. Um outro resultado desta reacção é que o sulfato, ao abandonar as paredes do electrodo, deixa que este fique novamente em contacto com o electrólito, facilitando assim a reacção anteriormente responsável pela descarga da célula.

Voltando à anterior técnica, e fazendo novamente uso das regras atrás enunciadas, calculam-se os respectivos números de oxidação aqui presentes, de forma a fundamentar a reacção química que rege a carga da célula electroquímica.

Usando a regra número 5 (2.1.1) observa-se que o número de oxidação do composto $PbSO_4$ é 0, pelo que do lado esquerdo desta reacção temos dois electrões livres estabelecendo então o balanço de cargas em -2. Olhando agora para a direita da mesma, tem-se o chumbo como elemento livre, pelo que, usando a primeira regra sabe-se que o número de oxidação do mesmo é 0, sobrando assim a carga presente no SO_4^{2-} para equilibrar com a carga que resultou na esquerda. Tal facto é bastante óbvio pois neste caso a carga electrónica é indicada e está de acordo com o esperado através da presença de dois electrões que garantem a igualdade dos números de oxidação resultantes do lado dos reagentes e produtos da reacção (2.9).

Olhando agora para o electrodo positivo, esta é a reacção química presente no mesmo quando a célula se encontra a carregar (2.10).



Analizando então a reacção aqui presente nota-se que, nesta fase, o electrodo positivo encontra-se, à semelhança do seu par estudado no caso anterior, sulfatado e imerso num electrólito composto por água que, como já se viu, é um dos produtos da reacção que ocorre durante a descarga da célula. Durante o processo de carga rompem-se as ligações das moléculas de água deixando hidrogénio e oxigénio em liberdade para se recombinarem respectivamente com o sulfato que se liberta da superfície do electrodo e formarem o ácido sulfúrico presente no electrólito, e com o chumbo presente no electrodo formando novamente um electrodo poroso de dióxido de chumbo.

É através da separação da molécula da água que se garante a carga no entanto, quando a bateria se encontra em plena carga 65% do electrólito é água, e portanto é extremamente importante saber quando parar o processo de carga da mesma. Se esta paragem não for atempadamente efectuada o processo de carga irá continuar a dividir a molécula da água resultando em hidrogénio que não se consegue recombinar em ácido sulfúrico, pois não existe sulfato suficiente no interior da bateria, e em oxigénio que também fica livre. Esta acumulação de gases vai aumentando a pressão no interior da bateria até atingir o limite de pressão determinado por válvulas presentes no topo da bateria que abrem nessa altura. Devido a este fenómeno todas as baterias de ácido chumbo, incluindo as seladas, têm estas válvulas diminuindo assim o risco de explosão da bateria pois não deixam a pressão atingir níveis que comprometam a estrutura da bateria. Devido a esta libertação de gases, as baterias devem ser carregadas em locais devidamente arejados e sem fontes de ignição por perto.

Uma carga que não seja atempadamente terminada irá, através do processo atrás descrito, desidratar a bateria resultando numa alteração da composição do electrólito reduzindo a capacidade e vida útil da mesma.

Desta forma fica então completamente descrito um ciclo da bateria terminando com esta novamente carregada através da reposição das características iniciais. É possível encontrar uma animação exemplificativa das reacções aqui descritas que torna a compreensão das mesmas mais simples.

2.2 Estrutura interna da bateria

2.2.1 Rectangulares

O interior da célula difere um pouco do até então demonstrado, sendo que, na realidade os electrodos são placas habitualmente rectangulares ou cilíndricas de forma a maximizar a sua área de contacto com o electrólito. Na Figura 2.2.1 exemplifica-se a constituição real de uma bateria electroquímica rectangular. Começando pela constituição das células da bateria numa forma bastante simplificada com o intuito de permitir uma melhor compreensão sendo que, na realidade ao invés dum único par de electrodos, existem vários pares por célula estando as diversas placas do ânodo em paralelo separadas das respectivas placas do cátodo, também estas em paralelo. A separação entre as diversas placas do ânodo e cátodo é garantida por separadores porosos que são constituídos por um material isolante, aqui representado a castanho (Figura 2.2.1 a), impedindo desta forma que cátodo e ânodo se toquem, sendo que em simultâneo e devido à sua porosidade deixa os iões H_2 e SO_4 passar. Este paralelo entre as diversas placas constituintes do ânodo e cátodo (Figura 2.2.1 b) tem, também ele, o objectivo de aumentar a área de electrodo em contacto com o electrólito o que maximiza a capacidade da bateria minimizando o volume, o que se traduz na maximização do volume útil para reagentes que são o “combustível” da reacção química que aqui ocorre [33].

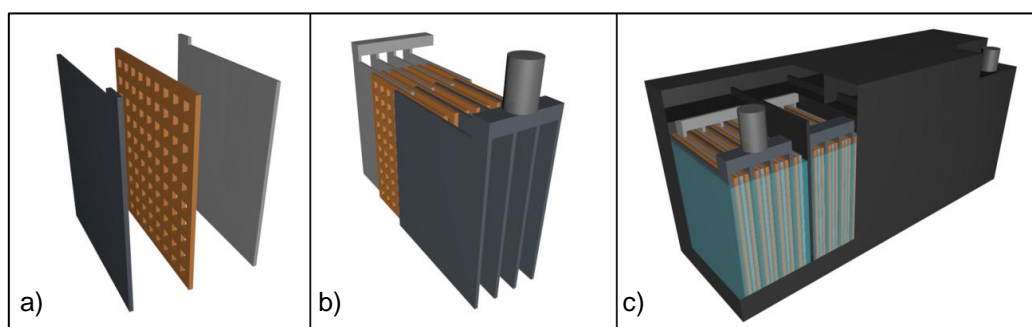


Figura 2.2.1: Composição real interna da bateria rectangular

2.2.2 Cilíndricas

Existem outras formas de baterias de ácido-chumbo menos usuais tais como as cilíndricas, esta menor popularidade prende-se principalmente com o facto de que a forma rectangular enquadra-se melhor com a maioria das aplicações das mesmas e assim maximiza a capacidade. A figura 2.2.2 diz respeito somente ao corte duma única célula de uma bateria cilíndrica, sendo a bateria um conjunto de células do mesmo tipo desta.

De notar que ambos os tipos de baterias (cilíndricas e rectangulares) podem ser construídos de outra forma variando de acordo com o fabricante e a finalidade das mesmas. Nos casos em que as baterias são especificamente desenhadas para ciclos de descargas profundas (indicadas para embarcações marítimas) estas são habitualmente mais altas e as placas dos electrodos não estão tão próximas do fundo. Isto porque, durante uma descarga profunda irão formar-se depósitos que, pela sua maior densidade, permanecem no fundo e que poderiam provocar curto-circuitos entre as diversas placas dos electrodos. Desta forma, os fabricantes optam por fazer uma bateria um pouco maior do que o necessário para atingir a respectiva capacidade mas com a vantagem da mesma ser mais tolerante a descargas profundas.

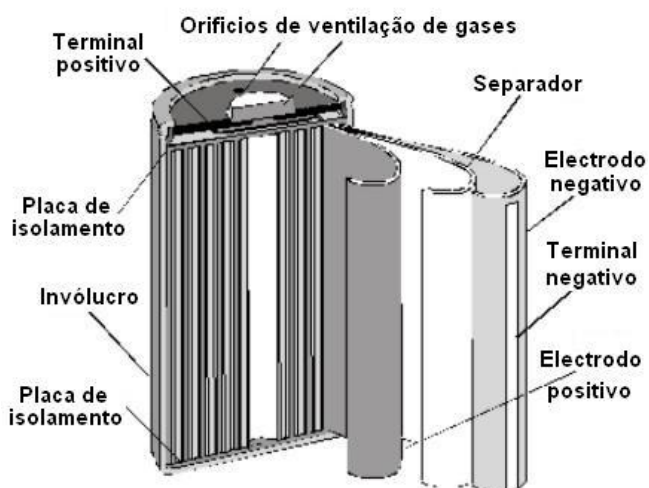


Figura 2.2.2: Corte de célula de bateria real cilíndrica

2.3 Capacidade

A capacidade da bateria é a indicação da quantidade de carga que a mesma consegue armazenar e é habitualmente expressa em Ah. Sabendo que a unidade da carga é coulomb, e que ampère é definido como coulomb/segundo, retira-se que $1\text{Ah} = 3600 \text{ coulombs}$. A capacidade da bateria é normalmente proporcional ao tamanho da célula, isto porque para conseguir aumentar a sua capacidade é necessário aumentar a quantidade de reagentes o que resulta no aumento de volume da mesma. Sabendo a capacidade e a tensão da bateria é também possível fazer a conversão da capacidade para Wh facilitando assim o utilizador que queira realizar cálculos de autonomia sabendo as potências dos circuitos a alimentar pela mesma.

Considerando como exemplo as baterias utilizadas para este estudo [35], que indicam 7,2Ah (20hr) como a sua capacidade, retira-se que estas baterias conseguem fornecer uns constantes 0,36 A durante 20 horas, isto porque a capacidade é o produto do tempo de descarga pela corrente que esta consegue fornecer ao longo desse mesmo intervalo de tempo. Essa é a fórmula responsável pelo cálculo da capacidade sendo que a única variação entre os diversos fabricantes é o intervalo de tempo de descarga considerado, que, por uma questão de marketing, usam normalmente o intervalo que melhor se adequa à sua bateria, apesar do mais comum ser as 20h presentes nos exemplares utilizados neste estudo.

Quando a descarga é efectuada ao ritmo indicado e a bateria está em boas condições resultará no final das 20h a tensão que o fabricante admitiu como sendo o valor inferior do intervalo de flutuação da mesma. Portanto a capacidade é a quantidade de energia que se consegue retirar da bateria desde o momento em que esta se encontra completamente carregada até ao momento em que se considera que esta está descarregada que coincide com o nível inferior do intervalo de flutuação. É importante perceber que mesmo quando a bateria se encontra neste ponto ainda contém carga e consegue continuar a fornecer energia, mas a partir desse momento a bateria começa a degradar-se pelo que este processo deve ser evitado sob pena da mesma poder ficar irremediavelmente danificada.

O valor de tensão que a bateria apresenta quando se encontra devidamente descarregada ronda os 1,75V por célula. De notar que este é um valor que varia consoante o modelo e fabricante da bateria e é, como a restante informação contida neste trabalho, válida somente para as baterias do tipo SLA aqui estudadas. Outra informação importante a reter é que a capacidade anunciada pelo fabricante é válida somente para descargas usando a corrente indicada durante o intervalo considerado, pelo que, descargas fazendo uso duma corrente superior resultam habitualmente numa menor capacidade. Devido a este facto é habitual encontrar no datasheet das baterias as diferentes capacidades que as mesmas apresentam consoante a taxa a que estas estão a descarregar (corrente instantânea) [35]. Esta característica sofre alterações consoante a temperatura (Gráfico 2.3.1) e também ao longo da vida da bateria (Gráfico 2.3.2), sendo que esta diminui ao longo dos ciclos de carga e descarga, diminuindo mais drasticamente quando as cargas e descargas saem da normal zona

de funcionamento da mesma [36] como se demonstra com valores obtidos no laboratório e que se encontram presentes no capítulo 4.

Gráfico 2.3.1: Impacto da temperatura e da taxa de descarga na capacidade

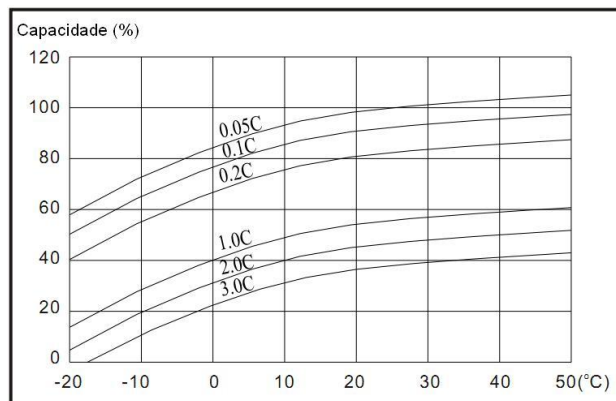
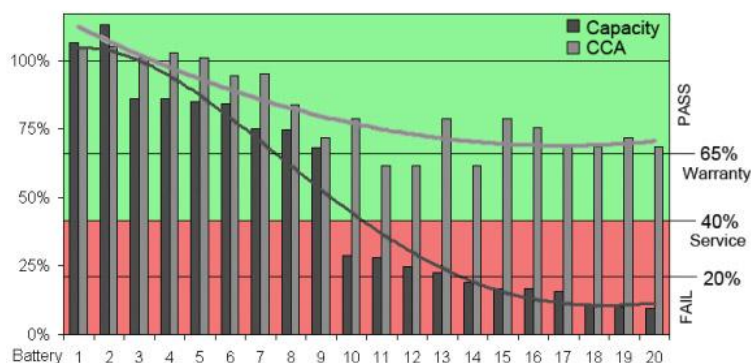


Gráfico 2.3.2: Teste de capacidade e taxa de descarga a 20 baterias envelhecidas [36]



Este Gráfico 2.3.2), cortesia da Cadex®, faz uma comparação da capacidade e da taxa de descarga de 20 baterias previamente utilizadas. Como se pode verificar pela curva a cinza escuro, 11 das 20 baterias aqui testadas já tinham perdido mais de 60% da sua capacidade inicial provando assim que a capacidade da bateria diminui com o seu uso e respectivo envelhecimento. Observando agora a curva a cinza claro é possível retirar uma outra conclusão, essa curva representa a capacidade da bateria para fornecer correntes elevadas e como se nota a média dos valores obtidos indica que as baterias também vão perdendo essa mesma característica com o envelhecimento.

Estes decréscimos estão ambos relacionados com um parâmetro interno da bateria que irei introduzir adiante e que é denominado por resistência interna.

Esta visível diminuição da capacidade da bateria faz com que este seja um parâmetro crítico limitativo da vida da mesma. Através duma correcta avaliação da capacidade da mesma quando confrontada com a aplicação em que esta está inserida torna-se então possível determinar se esta se encontra no seu final de vida.

2.4 Taxa de descarga

Este parâmetro indica a capacidade da bateria para fornecer energia, ou seja, é indicativo da taxa a que a bateria consegue libertar a energia que lhe foi previamente fornecida. Pode-se fazer uma comparação com um depósito de água, onde o parâmetro capacidade se refere, tal como o nome indica, ao volume de água que este suporta, enquanto que, a taxa de descarga pode ser comparada ao diâmetro da torneira por onde essa mesma água vai escoar. Portanto a taxa de descarga da bateria indica qual o fluxo de energia que esta consegue fornecer num determinado intervalo de tempo.

É usual usar como medida da taxa de descarga a letra C, em que esta representa a capacidade da bateria em uso. Portanto se uma bateria tem 7,2 Ah de capacidade, como é o caso das baterias usadas nesta dissertação, e esta estiver a ser descarregada a 1 C então significa que esta está a fornecer uma corrente de 7,2 A. No caso das baterias *SLA* aqui estudadas o mais habitual é a taxa de descarga anunciada ser de 0,05 C, ou seja, as 20 horas já aqui referidas.

Este tipo de baterias tem habitualmente valores de corrente de descarga máxima bastante elevados, tipicamente na ordem das centenas de amperes, 105 A durante 5 s no caso em estudo, o que indica que não há problema em pedir correntes elevadas à bateria, no entanto quando estas são descarregadas a 1 C apresentam habitualmente uma capacidade menor do que a real sendo que é possível acontecer o inverso se a descarga for lenta, pelo que em taxas de descarga inferiores a 0,05 C pode suceder uma bateria fornecer mais energia do que aquela que em teoria conseguiria armazenar.

Como se irá ver adiante, a leitura da capacidade depende muito da resistência interna da bateria, pelo que as discrepâncias entre a capacidade real e a esperada irão aumentar ao longo da vida da bateria.

2.5 Profundidade de descarga (*D.O.D*)

Este é o parâmetro da descarga que indica a quantidade de energia que se retirou da bateria durante a descarga pelo que esta vem habitualmente expressa como uma percentagem da capacidade nominal da mesma. Este parâmetro tem influência directa no número de ciclos de vida útil da bateria sendo estes inversamente proporcionais como se pode verificar pelos dados presentes na Tabela 3. No caso das baterias de ácido-chumbo em estudo existe habitualmente um valor máximo para a profundidade de descarga admissível que sendo ultrapassado pode impossibilitar a recarga das mesmas. A razão para este fenómeno advém do facto que uma bateria é habitualmente composta por uma série de células electroquímicas e entre elas existem diferenças. Como tal existem células que descarregam com mais facilidade que outras, pelo que quando se deixa a bateria ir além do ponto de interrupção é habitual haver

células com mais carga que outras pelo que as com menos carga acabam por receber carga proveniente das mais carregadas. Este fenómeno é chamado de reversão de célula e faz aparecer uma diferença de potencial negativa aos terminais dessa mesma célula. Em alguns casos, onde existem séries de baterias a alimentar um circuito, é inclusivamente possível que uma bateria apresente tensão negativa aos seus terminais caso se deixe esta ir além do ponto de interrupção. Este fenómeno provoca um curto-circuito eléctrico e habitual degradação dos electrodos, o que acaba por influenciar a capacidade da bateria ou danificar irremediavelmente a mesma obrigando à sua substituição devendo então a profundidade de descarga máxima aceite para o tipo de baterias em questão deve ser respeitada. De forma a evitar descarregar as baterias em demasia é habitual haver em série um equipamento denominado por controlador de carga que interrompe o fornecimento de energia quando estas atingem o ponto mínimo de carga [37].

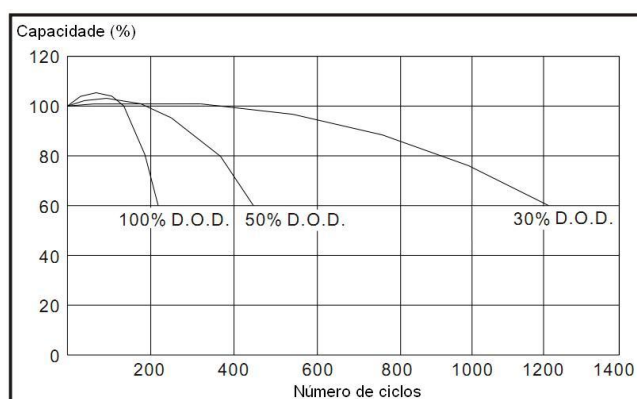
Tabela 3: Profundidade de descarga versus número de ciclos a 25°C (77°F) SLA [38]

Profundidade de descarga (%)	Número de ciclos
100	150 a 200
50	400 a 500
30	>= 1000

Como indicado no subcapítulo 1.2, é possível usar a tensão apresentada aos terminais da bateria para acompanhar o estado de carga da bateria, isto torna-se possível devido a um outro parâmetro da mesma que se introduz de seguida e que é denominado por resistência interna. Contudo este método para adquirir o estado da carga através da tensão tem associada alguma imprecisão porque as leituras de tensão flutuam com a carga que está a ser alimentada.

De seguida apresenta-se o gráfico 2.5.1, indicado pelo fabricante [34], como sendo o impacto da profundidade de descarga na capacidade de acordo com o número de ciclos.

Gráfico 2.5.1: Impacto da profundidade de descarga na capacidade



D.O.D – *Depth of discharge* (Profundidade de descarga)

2.6 Resistência interna

A resistência interna é outro dos parâmetros da bateria e, à semelhança dos anteriores, é influenciada por diversos factores. Esta varia de acordo com a temperatura, envelhecimento, estado de carga, entre outros. Facilmente se percebem as razões que levam a esta variação, se pensarmos que a resistência que um corpo oferece à passagem da corrente eléctrica varia consoante a densidade do mesmo e que esta é dependente de factores tais como a temperatura e os materiais dos quais este é composto.

A concentração de ácido sulfúrico presente no electrólito vai variando ao longo do ciclo, portanto é fácil compreender que influencie a alteração do valor da resistência interna ao longo do ciclo, ou seja, consoante o estado de carga da bateria.

Esta resistência interna é responsável pela perda de energia da bateria pois esta provoca uma queda de tensão o que faz que aos terminais da bateria surja uma tensão inferior à sua força electromotriz.

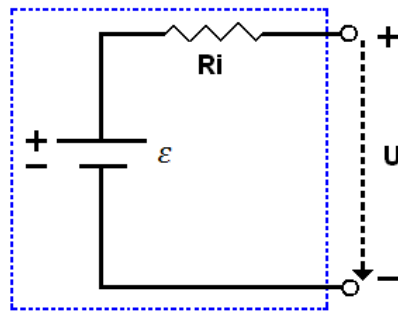


Figura 2.6.1: Esquema aproximado de uma bateria real em vazio

Como se pode observar na Figura 2.6.1, caso em que a bateria se encontra desconectada, o circuito está aberto o que faz com que não exista uma corrente a atravessar a resistência R_i e portanto em U aparece uma diferença de potencial de valor igual a ε devido à inexistência de queda de tensão em R_i .

$$U = \varepsilon - R_i \times i \quad (2.11)$$

Como o circuito se encontra em aberto tem-se que ($i = 0$), portanto resulta que $\varepsilon = U$

Daqui se conclui que ao usar um multímetro para fazer a leitura do valor da tensão aos terminais da bateria em vazio, e assumindo que o multímetro não interfere no circuito, iremos obter o valor da força electromotriz.

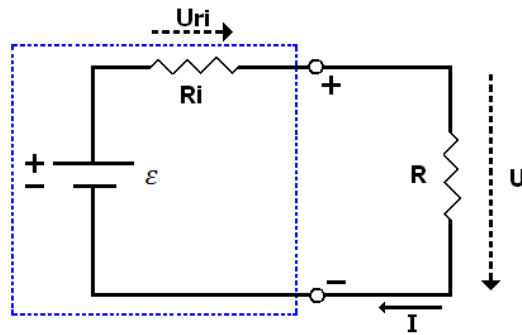


Figura 2.6.2: Esquema aproximado de uma bateria real em carga

Na Figura 2.6.2 temos então a bateria anteriormente representada mas agora com uma carga ligada aos seus terminais, completando dessa forma o circuito. Visto que o circuito está fechado a corrente tem então um caminho para percorrer que atravessa as resistências R_i e R provocando assim duas quedas de tensão (U_{ri} e U). A corrente ao atravessar a resistência interna origina uma queda de tensão U_{ri} que faz com que aos terminais da bateria apareça uma tensão U inferior à ε .

$$U = \varepsilon - R_i \times i \quad (2.12)$$

Como neste caso o circuito está fechado ($i \neq 0$), resultando $U = \varepsilon - U_{ri}$

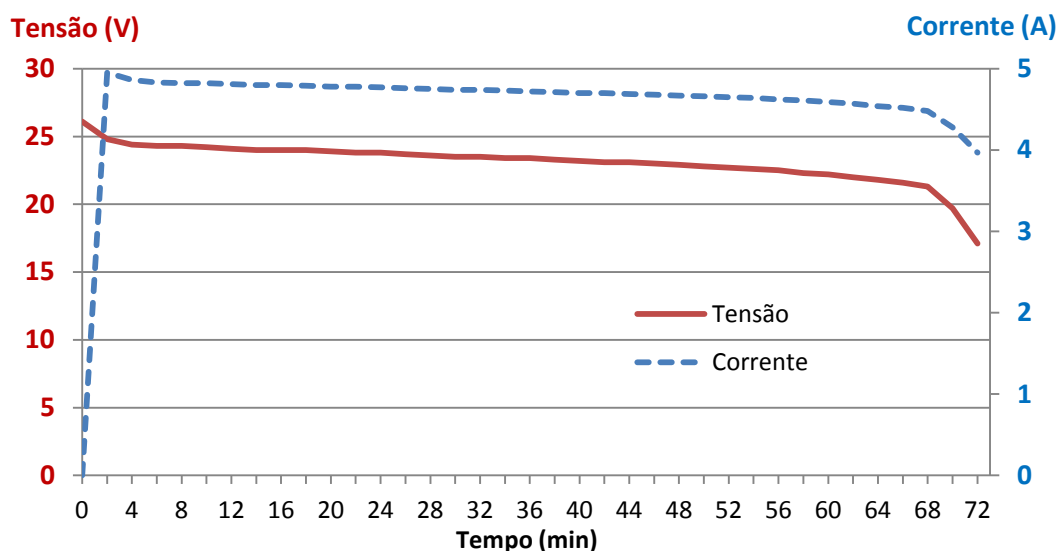
Deste caso pode-se concluir que a tensão que está realmente aplicada à carga depende da corrente que se está a pedir à bateria, pois quanto maior for a corrente i , maior será a queda de tensão interna à bateria e consequentemente menor será U [39].

Juntando agora toda a informação recolhida neste tópico consegue-se compreender que a concentração de ácido sulfúrico presente no electrólito vai diminuindo ao longo da descarga da bateria, e que essa alteração na densidade provoca uma diminuição da condutividade do electrólito [40], ou seja, a resistência interna da bateria vai aumentando à medida que esta alimenta o circuito. Aliado ao aumento da resistência interna vem o aumento da queda de tensão nessa mesma resistência, como tal, a tensão obtida aos terminais da bateria vai diminuindo à medida que esta vai descarregando como se pode comprovar no Gráfico 2.6.1. Agregando agora o facto de que a bateria se vai degradando ao longo dos ciclos é fácil perceber que a resistência interna tem o seu mínimo valor quando a bateria é nova e se encontra completamente carregada.

O decréscimo da tensão ao longo da descarga é uma desvantagem da bateria de ácido-chumbo quando comparada com outros tipos de baterias que não sofrem desta característica, pelo que em certas aplicações digitais é necessária a existência de um conversor DC/DC para garantir uma menor flutuação de valores à entrada do circuito. Esta desvantagem traz no

entanto a possibilidade da indicação do estado da carga da bateria através da simples leitura da tensão aos terminais da mesma. Sendo este um método bastante simples e prático, mas que se torna um pouco impreciso devido às flutuações da carga. Como tal existem diversos métodos para tentar avaliar a quantidade de carga ainda disponível na bateria.

Gráfico 2.6.1: Andamento da tensão e corrente ao longo da descarga



Existem também alguns métodos para tentar determinar o valor da resistência interna da bateria. Entre estes destaca-se o método DC pela facilidade com que permite a obtenção de valores recorrendo somente a um simples multímetro e a uma carga fixa. No entanto o teste não se deve fixar num único método sob pena de ter uma fraca precisão na medição.

Como se pode verificar no Gráfico 2.6.1 a tensão da bateria vai diminuindo ao longo da descarga portanto torna-se possível usar essa queda de tensão para calcular o valor da resistência interna usando o seguinte método.

1. Escolher um instante e registar a tensão e corrente. Dando como exemplo o minuto 12, onde voltímetro registava 24,1 V enquanto o amperímetro marcava 4,81 A.
2. Escolher um outro instante próximo do anterior pois o valor da resistência vai aumentando ao longo da descarga e voltar a registar tensão e corrente. Como o intervalo de aquisição de valores para este gráfico era de 2 minutos vai-se usar o minuto 14 onde o voltímetro assinalava 24,0 V enquanto que, o amperímetro indicava 4,80 A.
3. Aplicar a lei de Ohm ao intervalo considerado. Definindo a tensão e corrente do primeiro instante respectivamente por V_1 e I_1 e usando a mesma regra para o segundo instante sai:

$$R_{int} = \frac{V_1 - V_2}{I_1 - I_2} \quad (2.13)$$

Substituindo pelos valores:

$$R_{int} = \frac{24,1 - 24,0}{4,81 - 4,80} = 10 \, \Omega$$

Este é então o método DC para medição de resistência interna da bateria. Neste caso os 10 Ω obtidos dizem respeito a duas baterias de 12 V em série pelo que admitindo que ambas estão em condições idênticas a resistência interna resultaria em 5 Ω .

Sendo um pouco críticos é fácil perceber que 5 Ω é um valor elevado face aos 22 m Ω anunciados pelo fabricante. No entanto deve-se ter em conta que esses 22 m Ω são medidos quando a bateria é nova, se encontra em plena carga e à temperatura ideal de 25° C. Já a bateria aqui em teste encontra-se a uma temperatura superior, já efectuou umas quantas centenas de ciclos, alguns dos quais incorrectamente conduzidos, já não se encontra a plena carga, e que, devido à série de baterias, existe um cabo entre as mesmas. Somando a todas estas condições contrárias ao teste, há ainda o facto de que o intervalo entre medições foi demasiado longo. Para se obter melhores resultados deveria ter sido testada uma única bateria, o comprimento dos cabos deveria ter sido minimizado e o intervalo entre amostras deveria ser de segundos e não de 2 minutos. No entanto o equipamento existente não permitia uma maior precisão nas medições pelo que neste caso não traria nenhuma benesse aumentar a frequência dos mesmos, sob pena de anular o numerador ou denominador da expressão. Verificou-se também deste modo o valor da resistência ao longo da descarga e, tal como esperado, nota-se um ligeiro acréscimo da mesma tendo, a título de curiosidade, sido registado o valor de 8,3 Ω no início do teste enquanto a bateria se encontrava a plena carga.

Devido à bateria não ser um elemento puramente resistivo existem outros métodos, que além de conseguirem calcular a resistência interna permitem saber o valor capacitivo e indutivo da mesma mas que necessitam de equipamento sensível e específico.

O anterior gráfico (2.6.1) descreve o andamento da tensão e corrente numa descarga real, executada a um conjunto de duas baterias em série, e como tal irá ser novamente abordado no capítulo referente aos resultados obtidos. Os valores da resistência foram calculados usando os dados obtidos durante este mesmo teste e posteriormente confirmados com a execução de novos testes às baterias.

2.7 Estado de carga (S.O.C)

Este parâmetro é, tal como o nome refere, indicativo da quantidade de carga disponível na bateria. A finalidade da bateria é ser um dispositivo capaz de armazenar energia até que esta seja necessária, como tal, um dos parâmetros mais importantes da mesma é saber em cada instante qual a energia que esta tem para oferecer de modo a que o utilizador possa planejar o uso da mesma da forma mais eficiente tentando evitar que esta se descarregue antes de cumprir a função estipulada.

Há aplicações da bateria onde a importância deste mesmo parâmetro não é algo essencial sendo estas passíveis de interrupção a meio do trabalho sem contrair grande prejuízo, no entanto há outras onde este assume um papel fundamental tornando necessário um intenso estudo e acompanhamento deste mesmo parâmetro. Uma das aplicações de baterias em maior crescimento e que traz consigo essa necessidade é o uso de veículos eléctricos, pois é imperativo o utilizador saber em cada instante qual a autonomia do mesmo sob pena de ficar sem energia antes do término do percurso, um pouco à semelhança do indicador de nível de combustível presente nos automóveis equipados com motores de combustão interna.

Como se pretende que o robot usado neste estudo seja autónomo é necessário que este perceba que quantidade de energia tem ainda ao seu dispor de modo a que este não percorra uma distância superior à que limita um regresso à estação de carga. Este facto denominado por ponto de não retorno é muito conhecido no mundo da aviação pois durante os voos sobre o oceano há um momento em que o combustível presente no avião deixa de ser suficiente para regressar ao local de origem tendo a viagem de continuar independentemente do que aconteça.

No caso do robot, contrariamente ao do avião que tem diversos aeroportos capazes de suprir as suas necessidades, existe somente um local onde este pode ser recarregado autonomamente, como tal, torna-se necessário efectuar um cálculo constante da autonomia de forma a garantir que este nunca atinja esse ponto sob pena de esgotar a energia antes de acoplar à estação de carga.

Como é óbvio, esta autonomia é resultado do conhecimento de diversas variáveis da bateria tais como, a quantidade de carga ainda disponível, temperatura, e envelhecimento da mesma bem como outras características relativas ao percurso e consumo efectuados até então.

Devido à importância deste ponto surge a segunda parte desta dissertação como forma de estudo em torno do cálculo deste ponto, e como este varia consoante as características da bateria. Desta forma pretende-se que o robot passe a estimar a sua autonomia permitindo o planeamento prévio do seu percurso e assim garantir o retorno à base atempadamente

diminuindo o grau de dependência do utilizador e elevando desta forma o conceito de veículo autónomo a um novo patamar.

De entre os diversos métodos para medir o S.O.C destacam-se os seguintes:

2.7.1 Utilizando a química

Como referido anteriormente a composição do electrólito vai variando de acordo com a quantidade de carga presente na bateria, ou seja, o S.O.C. Como também já se demonstrou essa variação incide na concentração de ácido sulfúrico no electrólito e esta concentração faz a alteração do pH e da densidade do mesmo, portanto basta ter um dispositivo que faça a leitura do pH ou da densidade do electrólito e dessa forma obter um valor indicativo do estado de carga em que a bateria se encontra.

Este método é bastante simples mas vem com a limitação de que a bateria não pode ser do tipo selada o que impossibilita o uso desta forma de aquisição de dados no robot em estudo devido a serem estas as baterias em uso no mesmo.

2.7.2 Medindo a tensão

Como se viu, a tensão que surge aos terminais da bateria vai diminuindo ao longo do ciclo, portanto, através do conhecimento da sua curva de descarga é possível associar, com algum erro, uma tensão a um nível de carga.

Este método é de longe o mais fácil de implementar até porque faz uso de um simples voltímetro e de conhecimento que pode ser, em parte, adquirido nos manuais das baterias. No entanto, a tensão que se lê está relacionada com a resistência interna da bateria, e como tal essa queda de tensão é proporcional à corrente que a bateria está a fornecer. Portanto é bastante habitual a corrente incidir mais no valor da tensão do que a quantidade de carga presente na mesma. Uma solução encontrada é a correlação entre a corrente e a tensão que é apresentada nesse mesmo instante, através dum coeficiente correspondente ao nível de corrente que ao ser multiplicado pelo valor da tensão resulta num cálculo do estado de carga mais realista. Alguns fabricantes indicam no manual das suas baterias as curvas características das mesmas sob diversas correntes retirando esse trabalho ao utilizador [41].

Outra forma encontrada para solucionar este problema é medir a tensão da bateria com o circuito aberto e comparar o valor obtido com a tabela fornecida pelo fabricante tendo o cuidado de fazer o acerto de acordo com a temperatura a que a bateria está sujeita. Este método tem como principal desvantagem a necessidade de desligar a conexão da bateria ao circuito antes de se efectuar a leitura da tensão.

2.7.3 Integrando a corrente

Um outro método é baseado na integração da corrente à medida que a bateria vai alimentando o circuito. Ao integrar a corrente resulta uma capacidade e essa capacidade pode ser subtraída à capacidade da bateria, resultando na quantidade de carga ainda presente na bateria. Para que este método resulte é necessário haver um ponto de referência que pode ser obtido por um qualquer método que indique que a bateria está completamente carregada e nesse estado faça um *reset* ao integrador. Desta forma, na próxima descarga o integrador sabe que iniciou em $S.O.C = 100\%$ e que o resultado da sua integração deve ser subtraído a esse mesmo ponto.

Uma outra fonte de erro neste método é o facto de que a bateria vai perdendo capacidade ao longo dos ciclos e portanto os 100% vão correspondendo a uma capacidade que é decrescente ao longo do tempo originando desta forma um desvio. Esse mesmo erro pode ser corrigido se ocasionalmente o valor da capacidade correspondente aos 100% for actualizado com os valores reais medidos nas descargas anteriores.

Para se calcular o ponto onde se admite que a bateria está completamente carregada é habitual o uso dum filtro de Kalman aplicado ao modelo eléctrico da bateria.

Como neste trabalho se pretende efectuar um estudo da bateria que resulte no conhecimento do estado de carga da mesma, vou voltar a falar nestes métodos adiante com excepção do método químico que está imediatamente posto de lado devido ao facto de que as baterias em causa são seladas. Como tal pretende-se implementar um sistema que efectue um cálculo do estado de carga misturando o método integrador de corrente com o conhecimento da tensão da mesma.

2.8 Razões que levam à diminuição da capacidade

Como atrás se viu, ao longo da descarga da bateria vai ocorrendo a sulfatação que acaba por inibir o fluxo de corrente entre electrodos. Este processo é depois invertido durante a carga quando o sulfato é novamente associado ao hidrogénio e oxigénio para formar ácido sulfúrico. Acontece que a carga não consegue retirar todo o sulfato dos electrodos, pelo que em cada ciclo existe uma pequena porção que vai permanecendo nos electrodos e que desta forma vai retirando capacidade à bateria. Além deste processo de sulfatação soma-se a corrosão da grade positiva que é um processo entrópico e como tal inevitável, havendo somente técnicas que são empregues para abrandar a mesma [42].

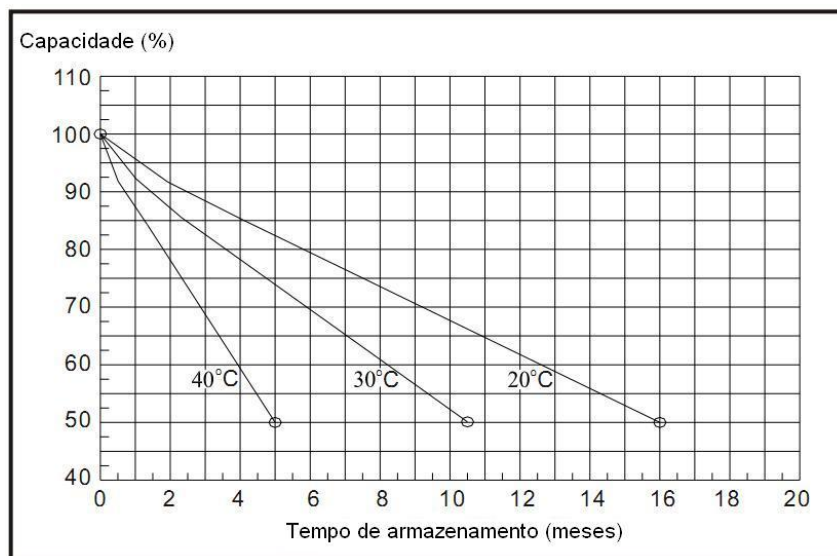
Uma outra razão que contribui para a diminuição da capacidade é o aumento da resistência interna, pois esta aumenta ao longo da vida da bateria e como atrás exemplificado quanto maior for a resistência interna mais a tensão fornecida pela bateria vai afundar quando submetida a correntes elevadas, cortando assim o fluxo de energia para o equipamento.

2.9 Auto descarga

Este é um fenómeno subjacente a todos os tipos de baterias e é o responsável pela descarga da bateria mesmo enquanto esta se encontra em repouso. Esta característica varia bastante de acordo com o tipo da bateria, podendo, no caso das baterias construídas à base de Níquel, atingir os 15% da capacidade nas primeiras 24 horas após carga das mesmas e depois outros 15% de decréscimo mensal. Felizmente a bateria de ácido-chumbo é bem menos susceptível a este fenómeno estando entre as que melhor se comporta neste campo. A taxa de auto descarga deste tipo de baterias ronda os 5% da capacidade ao mês sendo de 3% da capacidade a 20°C no caso das baterias em estudo. De notar que estes valores são aproximações e que estes em média dobram a cada 10°C acima da temperatura óptima de funcionamento das mesmas pelo que o fabricante das baterias aqui usadas indica nas especificações uma taxa de auto descarga a 20°C para, numa questão de marketing bastante usual neste mercado, tentar ludibriar os clientes de que a sua bateria é melhor que a média, que habitualmente indica a taxa a 25°C.

As curvas de auto descarga indicadas pelo fabricante podem ser observadas no Gráfico 2.9.1.

Gráfico 2.9.1: Curva característica da auto descarga a diferentes temperaturas



2.10 Associação de baterias

Neste subcapítulo irão ser abordados os modos de ligação possíveis entre baterias pois uma única bateria nem sempre é suficiente para suprir os requisitos do circuito. Portanto nos casos onde se necessita de uma maior capacidade ou tensão do que a oferecida por uma única bateria, existe a necessidade de associar esta a outra(s) de modo a aumentar a capacidade total da “bateria resultante”. A este conjunto dá-se o nome de banco de baterias, e

este deve ser dimensionado consoante a potência e autonomia que se pretende para o aparelho em questão.

A autonomia do veículo está directamente relacionada com a capacidade do seu banco de baterias, sendo que é possível dobrar esta última fazendo paralelos entre baterias. Este facto faz sentido caso se pense que as baterias são dispositivos que armazenam energia, e portanto ao se aumentar a capacidade de armazenamento, numa forma em que ambas possam fornecer corrente eléctrica “sem que uma influencie a outra”, sai logicamente que a corrente total será a soma das suas correntes.

2.10.1 Baterias em paralelo

Para que este processo seja correctamente efectuado é necessário que ambas as baterias tenham características semelhantes. No entanto, até dentro do mesmo modelo de baterias produzidas pelo mesmo fabricante existem pequenas diferenças que, ao influenciarem o valor da força electromotriz, vão levar ao aparecimento de correntes internas à associação, que por sua vez resultam em consumos de energia indesejáveis. Como tal, a associação de baterias em paralelo deve ser evitada, ou efectuada tendo presente este fenómeno.

Usando como exemplo as baterias presentes no robot apresenta-se a seguinte figura explicativa desta mesma associação de baterias (Figura 2.10.1). De acordo com alguns fabricantes de baterias a ligação do paralelo à carga deve ser efectuada seguindo as ligações presentes na Figura 2.10.1 [43], retirando o polo positivo da primeira bateria do paralelo e o negativo da última, ou vice-versa. Isto obriga a que todas as baterias contribuam de forma mais equilibrada equilibrando assim as capacidades. Caso ambas as ligações sejam retiradas da mesma bateria é possível que esta forneça mais energia que as restantes.

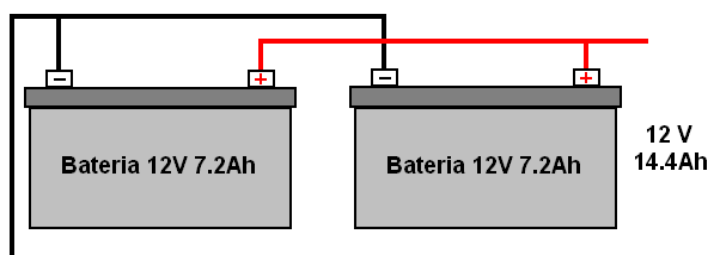


Figura 2.10.1: Associação de baterias em paralelo

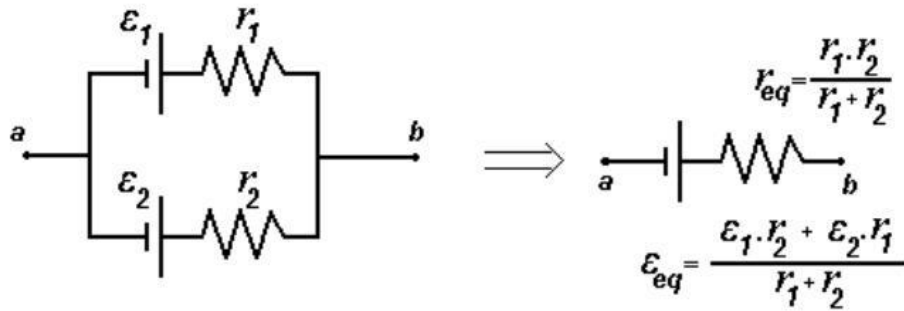


Figura 2.10.2: Circuito eléctrico equivalente de duas fontes em paralelo

$$i = i_1 + i_2 \quad (2.14)$$

Como se encontram em paralelo a tensão V_{ba} pode ser expressa como função de qualquer uma das fontes.

$$V_{ba} = \varepsilon_1 - i_1 R_1 \quad (2.15)$$

$$i_1 = \frac{\varepsilon_1 - V_{ba}}{R_1} \quad (2.16)$$

repetindo o processo da equação 2.16 para a fonte 2 e substituindo na equação 2.14 sai que:

$$i = \frac{\varepsilon_1 - V_{ba}}{R_1} + \frac{\varepsilon_2 - V_{ba}}{R_2} \quad (2.17)$$

pelo que, reescrevendo a mesma de forma a isolar a diferença de potencial sai que:

$$V_{ba} = \left(\frac{\varepsilon_1 R_2 + \varepsilon_2 R_1}{R_1 + R_2} \right) - \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot i \quad (2.18)$$

Comparando a expressão 2.18, à 2.12 chega-se à conclusão de que são exactamente a mesma, provando assim que duas fontes em paralelo se comportam de forma equivalente a uma única fonte com as características descritas na Figura 2.10.2:.

É possível fazer o paralelo entre baterias de capacidades diferentes, no entanto essa associação deve ser evitada, pois deste modo o mais provável será que a bateria de menor capacidade se esgote mais rapidamente, baixando assim o valor da tensão aos seus terminais, e de seguida passe a ser carregada pela bateria de maior capacidade, que ainda apresenta uma tensão superior conduzindo o par ao equilíbrio de tensão.

2.10.2 Baterias em série

Na Figura 2.10.3 pode-se ver um exemplo duma associação de baterias em série, pois o terminal positivo da bateria da esquerda está ao mesmo potencial do terminal negativo da bateria da direita, sendo que ambos estão aproximadamente 12 V acima do potencial encontrado no terminal negativo onde está conectado o fio preto. Como a segunda bateria contribui com outros 12 V, estes somam-se aos 12 V já existentes no seu terminal negativo e como tal podem-se obter os 24 V no seu terminal positivo. Como nesta configuração a corrente atravessa ambas as baterias tem-se que a corrente máxima tem módulo igual ao máximo que cada uma pode oferecer, como tal, também a capacidade da bateria resultante será também a mesma que cada uma indica.

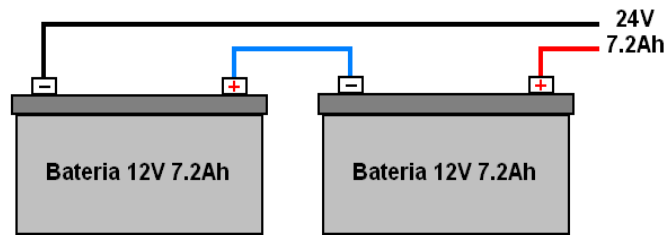


Figura 2.10.3: Associação de baterias em série

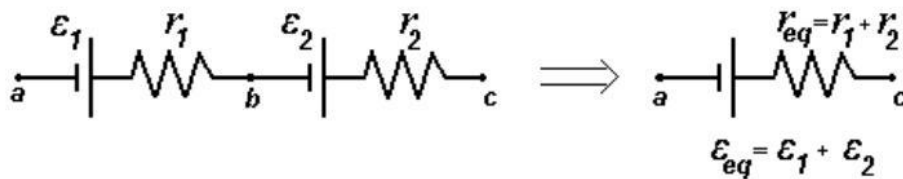


Figura 2.10.4: Circuito eléctrico equivalente de duas fontes em série

$$V_{ca} = V_{ba} + V_{cb} \quad (2.19)$$

Usando a equação descrita em 2.15 para descrever a tensão entre os pontos a e b, e percebendo que, de forma equivalente, se pode descrever a queda de tensão entre os pontos b e c sai que:

$$V_{ca} = \varepsilon_1 - i_1 R_1 + \varepsilon_2 - i_2 R_2 \quad (2.20)$$

reorganizando a equação sabendo que, devido à montagem em série, as correntes i_1 e i_2 são a mesma fica:

$$V_{ca} = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) - (R_2 + R_1) \cdot i \quad (2.21)$$

Desta forma chega-se novamente a uma expressão similar à da fonte de tensão indicada em 2.12 o que indica, que também desta forma se pode calcular uma única fonte que seja equivalente à junção de duas fontes em série tendo esta as características enunciadas em 2.21.

2.10.3 Compostas (série paralelo)

Até aqui já se viu que, de acordo com as características do projecto, pode existir a necessidade de conexão de baterias em série, nos casos onde a capacidade duma única bateria seja suficiente, mas se pretenda uma tensão superior, ou em paralelo, nos casos onde a tensão duma só bateria seja suficiente mas que se pretenda uma maior capacidade. Podem existir ainda casos onde se pretenda uma tensão superior, ao mesmo tempo que uma maior capacidade. Nesses casos existe então a necessidade de se juntar ambas as formas de ligação de forma a obter ambas as condições.

O robot em estudo é um desses casos tendo baterias de 12 V numa configuração série que, de acordo com a expressão 2.21, permite obter 24 V de tensão nominal, e simultaneamente em paralelo, de forma a dobrar a sua capacidade.

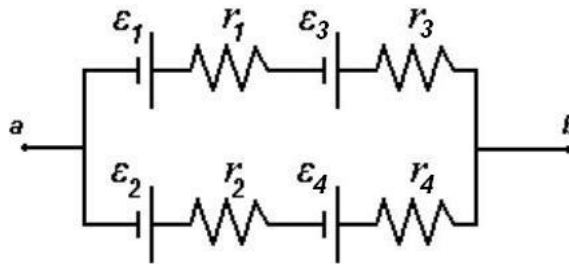


Figura 2.10.5: Circuito eléctrico composto (série paralelo)

$$V_{ba} = \left(\frac{\varepsilon_1 R_2 + \varepsilon_2 R_1}{R_1 + R_2} \right) + \left(\frac{\varepsilon_3 R_4 + \varepsilon_4 R_3}{R_3 + R_4} \right) - \left(\left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) + \left(\frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \right) \right) \cdot i \quad (2.22)$$

Como se pode ver pela Figura 2.10.5, e pela expressão 2.22, a força electromotriz gerada pelas fontes 1 e 2 aparece a somar com a fornecida pelas fontes 3 e 4, resultando dessa forma no 24 V de tensão nominal. Além disso é possível verificar que as fontes 1 e 3 partilham a mesma corrente que vai ser somada à corrente proveniente das fontes 3 e 4 dobrando dessa forma a corrente que a bateria resultante consegue fornecer aumentando simultaneamente a sua capacidade total.

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

3 Desenvolvimento de protótipo

No início deste estudo o robot apresentava um circuito eléctrico exemplificado de uma forma bastante simplificada na figura 3.0.1.

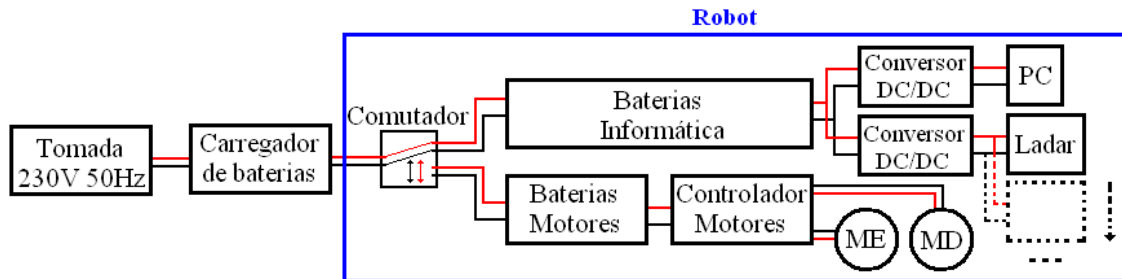


Figura 3.0.1: Circuito eléctrico inicial simplificado

Simplisticamente, representam-se aqui alguns dos principais componentes eléctricos presentes no robot. De notar que todos os dispositivos presentes na caixa azul estão fisicamente inseridos na arquitectura do robot deslocando-se juntamente com este. Observando o esquema percebe-se imediatamente que existiam dois grupos separados de baterias em que um se destinava a alimentar a “inteligência” do robot enquanto que o outro era destinado à sua locomoção, através da alimentação do controlador que por sua vez actuava os motores esquerdo e direito, isto acontecia devido ao facto dos motores introduzirem bastante ruído no circuito o que poderia ser problemático para os componentes informáticos caso estes fizessem uso do mesmo banco de baterias.

Os equipamentos exteriores ao robot estão representados fora da caixa azul e são constituídos por uma simples tomada eléctrica normal e um carregador de baterias. Este tipo de arquitectura exigia a presença dum operador para fazer a ligação do carregador ao comutador que posteriormente seleccionava qual o conjunto de baterias a carregar e no final da carga deste grupo usava o comutador para carregar o outro conjunto. Este processo era pouco eficiente e os planos futuros exigiam que o processo de carga fosse autónomo de forma a que o robot quando estivesse a necessitar de energia conseguisse chegar a um local previamente definido, efectuar uma carga e posteriormente continuar com os anteriores planos de execução. Para tal foram propostas e analisadas várias arquitecturas das quais se elegeu a representada na figura 3.0.2.

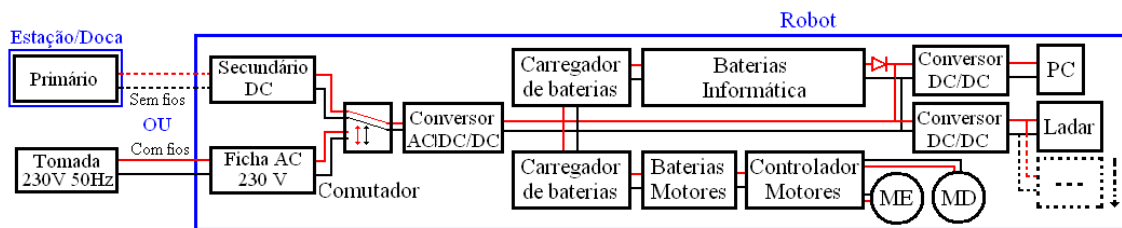


Figura 3.0.2: Diagrama de blocos representativo da solução escolhida

Este foi então o diagrama escolhido para cumprir com os requisitos enunciados, de notar que continua a existir um comutador que tem como função alterar entre as diferentes fontes de energia responsáveis pelo carregamento do robot. Isto porque, em paralelo com o projecto do robot está a decorrer o projecto de uma estação de carga aqui representada, como estação/doca, e que tem como função a carga do robot duma forma autónoma e sem contacto. Desta forma o robot estacionaria sobre uma placa pertencente à doca que emite pulsos electromagnéticos que são por sua vez captados pelo robot que é deste modo alimentado enquanto aí se encontra. Como o projecto da estação se encontra em fase de protótipo e existe a necessidade de se continuar a avançar com o projecto do robot deve existir em paralelo a forma de carga através duma simples tomada eléctrica, pelo que quando se pretende utilizar o robot autonomamente o comutador ficará na posição representada na figura 3.0.2, enquanto que, quando se pretenda um uso manual o utilizador deverá alterar a posição do comutador.

Uma visível alteração desta arquitectura é a inserção de um conversor AC|DC / DC que, tal como o nome indica, tem como função converter a sua entrada, podendo esta ser uma componente AC ou DC, em DC. Este conversor deverá ser inserido à entrada do circuito de modo a que a energia que entra fique imediatamente convertida na forma que é posteriormente utilizada, que se pretende rondar os 32 V. Este valor é explicado com a necessidade de carga de baterias de 24 V e sabendo que esta é a sua tensão nominal e que as mesmas necessitam atingir 29 V durante a carga, portanto sobram 3 V que são usados nas quedas de tensão do circuito carregador. Esta imediata conversão para DC faz com que se poupe em peso e em complexidade, pois caso contrário seria necessário equipar os restantes dispositivos com conversores similares a este. De notar que a jusante deste conversor existem outros dois conversores DC/DC em que um é de 24/12 enquanto que, o outro é de 24/24 e é utilizado somente para garantir uma tensão constante apesar das flutuações existentes nas baterias. Pretende-se também que com o uso do primeiro se consiga anular este conversor DC/DC de 24/24 libertando desta forma espaço e poupando em peso o que se traduz numa maior autonomia do robot.

Esta arquitectura foi dimensionada para permitir que enquanto o robot se encontra em carga todos os circuitos informáticos sejam directamente alimentados pela estação base, característica essa que se torna possível através da inserção do díodo representado a

vermelho entre as baterias da informática e os conversores DC/DC. Observando o circuito percebe-se que quando o robot se encontra em carga o primeiro conversor impõe uma tensão que é responsável pela carga das baterias e pela alimentação do restante circuito. Como estes estão fisicamente ligados, a tensão que surgirá no cátodo do díodo será superior à existente no ânodo ficando o díodo inversamente polarizado que resulta na abertura do circuito. Este facto permite que as baterias possam carregar sem alimentar o circuito em simultâneo o que acabaria por prejudicar o seu normal ciclo de funcionamento e comprometeria a sua vida útil.

Esta acaba por ser uma solução elegante pois é completamente autónoma e bastante simples, pois quando a carga termina o robot pode abandonar a estação que leva a que a tensão no cátodo do díodo caia resultando na polarização directa do mesmo e posterior fluxo de corrente eléctrica da bateria para os conversores. Um ponto contra esta simples solução advém do facto que o díodo enquanto condutor impõe uma pequena queda de tensão que é desnecessária face a outras soluções e que se torna num desperdício de energia e posteriormente numa menor autonomia pois, além do consumo do díodo em si, essa queda de tensão baixa o valor de tensão que está presente aos terminais da bateria. Esta simples solução tem então este pequeno inconveniente que pode ser minimizado através de uma procura eficiente no mercado de fabricantes de díodos. Isto porque existem no mercado díodos que cumprem os requisitos tendo simultaneamente uma baixa resistência interna garantindo desta forma que a energia despendida pelo mesmo acaba por não ter uma grande influência nas contas finais.

Esta arquitectura impõe à partida uma conversão para DC levando a que os carregadores de baterias sejam também eles alimentados em DC o que não é uma característica habitual dos carregadores existentes no mercado. Essa invulgar característica aliada à necessidade de obtenção de dados sobre o andamento das correntes e tensões ao longo da carga e às restantes especificações do projecto levaram a que não tenha encontrado no mercado um dispositivo capaz de cumprir com todos os requisitos.

Inicialmente optou-se pelo caminho mais simples que assentava na alteração de um carregador comercial. O plano era então retirar o circuito presente à entrada do mesmo, responsável pela conversão AC/DC, e usar somente o circuito que faz a gestão da carga que é enviada para a bateria. Esta abordagem, mais simples é no entanto mais limitativa, pois o comportamento passava a estar restrito aos padrões de funcionamento impostos pelo fabricante do mesmo. Como também se pretendia que o tempo de carga fosse diminuído, e o banco de baterias suportava ritmos de carga superiores aos impostos pelo carregador existente, optou-se pela construção de raiz de um circuito carregador de baterias, que desta forma seria dimensionado propositadamente para o caso em estudo, e como tal cumpriria à risca os requisitos enunciados, diminuindo assim o tempo de carga do robot.

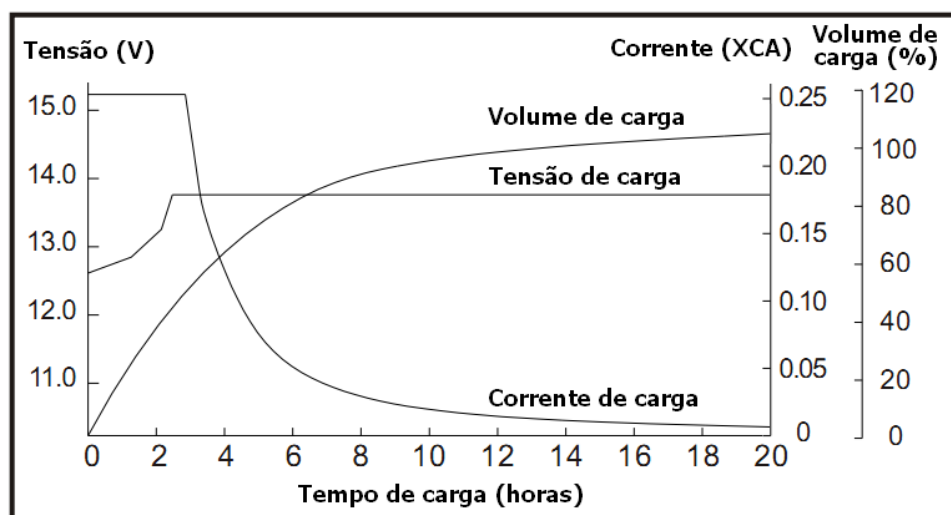
Esta nova arquitectura obrigou à construção de novos equipamentos que serão descritos de seguida.

3.1 Carregador de baterias do tipo SLA

Um carregador de baterias é um dispositivo que tem como função fornecer energia eléctrica à bateria de forma a que esta a consiga armazenar. O modo como essa energia deve ser fornecida varia consoante o tipo de bateria em causa e o estado de carga da mesma em cada instante. Torna-se então imperativo que, ao longo da carga, se vá fazendo uma avaliação do estado de carga de modo a que a transferência de energia esteja, em cada instante, adequada às características da bateria. Como se irá ver adiante, o carregador irá carregar as baterias por patamares, onde a cada patamar corresponde um nível de tensão e corrente.

Sendo que as baterias presentes no robot nesta fase eram de ácido-chumbo seladas [34], a carga deve ser efectuada seguindo a seguinte curva característica (Gráfico 3.1.1).

Gráfico 3.1.1: Curva característica de carga a 25°C [34]



Como se pode observar pela característica de carga indicada no anterior gráfico, fornecido pelo fabricante das baterias, tanto a tensão, como a corrente variam de acordo o estado de carga da bateria. Este gráfico diz respeito a uma carga efectuada com uma corrente máxima de XCA, o que, substituindo o X por 0,25, tal como indicado no gráfico, e o C por 7,2, que é a capacidade das baterias em questão, resulta 1,8 A. Sabendo que a corrente máxima admissível pela bateria é 2,88 A então esta foi uma carga feita de uma forma correcta, uma vez que o limite máximo de corrente não foi ultrapassado e que a corrente foi sendo diminuída à medida que a bateria foi ficando carregada. Olhando para a tensão também podem se retiradas algumas conclusões, pois enquanto a bateria esta a ser carregada usando como corrente os 1,8 A, a tensão esta a subir com uma elevada taxa, sendo que esta diminui quando a corrente baixa. O que, faz todo o sentido pois, o limite da capacidade começa a aproximar-se logo essa aproximação deve ser efectuada de uma forma mais vagarosa e como tal, mais controlada.

A bateria, quando bem usada, não deve ser demasiado descarregada, deve flutuar sempre dentro de um determinado valor de carga ao qual se pode corresponder um intervalo de tensão, pois, como se pode ver pelo anterior gráfico, quanto mais carregada se encontra a

bateria, maior é a tensão que esta apresenta aos seus terminais. Esse intervalo é denominado por intervalo de flutuação, e deve ser cumprido de forma a maximizar a vida da bateria.

Importa referir, que este gráfico foi construído dentro desse mesmo intervalo, pelo que onde se lê 0% de carga, não significa que a bateria esteja completamente descarregada, mas sim que esta se encontra no limite inferior do intervalo de flutuação. Como este 0 % não é real, torna-se possível continuar a retirar energia da mesma abaixo dos 12,5 V, valor indicativo do limite inferior do intervalo de flutuação, mas tal deve ser evitado, pois estamos a retirar a bateria da sua zona de conforto, para a qual foi dimensionada e, pode acontecer que as reacções químicas que ocorrem durante a descarga da mesma danifiquem os electrodos ao ponto de impossibilitar a reversibilidade da reacção, ou seja, ao ser demasiado descarregada a bateria pode sofrer danos internos impedindo a sua futura recarga. Este é um fenómeno que nem sempre acontece, sendo mais usual que essa descarga incorrecta não danifique a bateria por completo, mas sim, que lhe retire parte da capacidade devido à perda parcial de área activa das chapas dos electrodos.

Caso a bateria tenha sido demasiado descarregada, mas que não tenha perdido totalmente as suas propriedades então a próxima carga deverá ser iniciada de uma forma mais lenta, pois, neste estado a bateria encontra-se “sequiosa” por corrente eléctrica e, se esta lhe for fornecida em ritmos elevados, acaba por danificar os eléctrodos devido à falta de tempo para a reacção química. Este patamar de carga, onde a energia é transferida com uma baixa taxa de transferência é denominado por *trickle charge*, e deverá ser o primeiro patamar a implementar, caso o nível de tensão da bateria esteja abaixo do intervalo de flutuação.

O segundo patamar, denominado por *bulk charge*, é iniciado quando a tensão da bateria atinge o nível inferior do intervalo de flutuação (V_T) (visível na figura 3.1.4) e é o patamar responsável pela maior contribuição de energia, pois, é neste patamar que se fornece energia com a maior taxa de transferência (I_{max}). Este patamar pode ser observado no anterior gráfico, está situado nas primeiras 3 horas de carga e é onde a corrente tem o seu valor máximo. Neste caso a bateria começou por ser carregada imediatamente com *bulk charge* porque a sua tensão se encontrava no intervalo de flutuação, caso a tensão inicial estivesse abaixo de V_T a carga teria iniciado com *trickle charge*.

Esta taxa de transferência (I_{MAX}) irá manter-se até que o limite superior do intervalo de flutuação ($V_{12} \approx 95 \% \text{ de } V_{OC}$) seja atingido, e nessa altura, será iniciado um novo patamar denominado por *overcharge*, onde a taxa de transferência de energia irá descer da actual I_{MAX} , para I_{OCT} , sendo que, pouco depois a carga será dada por terminada. A tensão da bateria estabiliza em V_F (visível na figura 3.1.4), ficando o carregador a aguardar que algo retire carga à bateria para que este a volte a carregar.

Sabendo agora que as decisões quanto à tensão e corrente a impor à bateria são tomadas de acordo com a tensão que esta vai apresentando, sai com naturalidade o pensamento de que será necessário algum tipo de inteligência que receba como entrada a

tensão existente na bateria e force aos terminais da mesma uma corrente e tensão controladas (Figura 3.1.1).

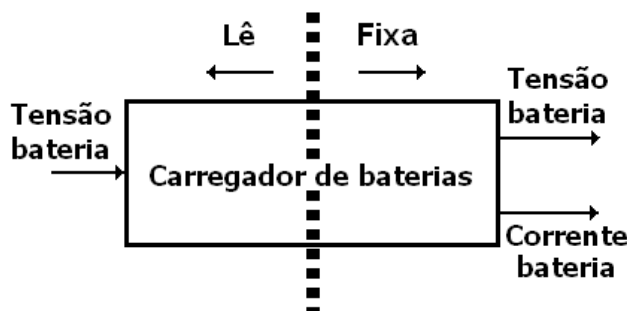


Figura 3.1.1: Diagrama de blocos simplificado do carregador de baterias

Com a ajuda desta imagem (Figura 3.1.1) podemos então perceber que o controle do carregador deve conseguir medir a tensão que se encontra nos terminais da bateria através de entradas analógicas, e com essa informação deve tomar certas decisões de forma a impor nas suas saídas algum sinal que permita controlar um circuito que devolva tensão e corrente de acordo com o patamar correspondente à tensão que foi anteriormente lida. Desta forma, e após alguma pesquisa, foram apresentadas várias formas possíveis de construção para esse mesmo carregador, das quais se destacam as seguintes.

3.1.1 Uso de PIC

A ideia por detrás deste carregador seria fazer uso de um controlador de interface programável, vulgo PIC, para fazer o controle do carregador. Esse PIC é um tipo de microcontrolador que tem entradas e saídas analógicas e que permite a sua programação, de modo a que este reaja às entradas da forma que o programador deseja. Um exemplo deste controlador pode ser encontrado seguindo esta referência [44].

Existe um tipo de conversor DC/DC, denominado por *Buck*, que tem como função converter uma tensão contínua numa outra tensão contínua, mas de valor inferior. Resumindo, este tipo de conversor fornece à saída uma tensão contínua inferior à que tem na sua entrada. Pode-se estabelecer comparação com o transformador sendo que esse desempenha esse papel em AC frente ao conversor que o faz em DC. À semelhança do transformador, que pode ser dimensionado para baixar ou aumentar a tensão, também o conversor pode ser dimensionado para tal função, sendo que um conversor para aumento de tensão é denominado por *Boost* e tem um circuito um pouco diferente do aqui apresentado (Figura 3.1.2).

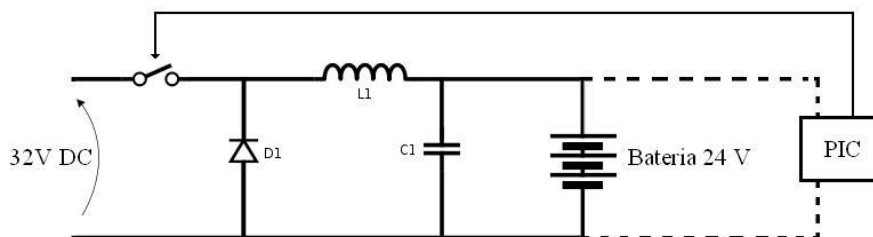


Figura 3.1.2: Transformador Buck, usando PIC

Como as baterias presentes no robot estão associadas em série e simultaneamente em paralelo, a tensão nominal final do banco de baterias é de 24 V, pelo que aquando da sua carga quando se atinge o patamar de *overcharge* será necessário forçar aproximadamente 29,5 V aos terminais das baterias. Essa será então a tensão máxima que irá aparecer aos terminais do banco, e portanto pode-se partir daí e da corrente máxima que se pretende que flua para as baterias e dessa forma programar o PIC para que este actue no interruptor, que na realidade é um transístor, e que, consoante o tempo que este permanece fechado, acumula energia na bobine e no condensador que a fornecem à bateria quando esse interruptor é aberto. Através dessa relação entre o tempo que o circuito está aberto e fechado é possível controlar-se a tensão que é entregue à carga, ou seja, à bateria. Seria também possível fazer essa queda de tensão através de uma simples resistência em série que tivesse um valor que iria variando e dessa forma mudando o valor da queda, mas essa seria uma forma muito pouco eficiente pois a energia seria perdida por forma de calor, enquanto que este tipo de conversores, quando bem dimensionados, podem atingir uma elevada eficiência energética (95%).

Esta foi uma das ideias propostas [45] mas não foi a realmente seguida pois, durante o dimensionamento deste circuito, encontrou-se um outro que aparenta ser uma melhor solução e que será demonstrado de seguida.

3.1.2 Uso do UC3906

Durante as pesquisas encontrou-se um integrado [46] desenhado e produzido pela texas instruments cuja especificidade era o controlo de carga em baterias SLA. Tal facto simplifica imenso o projecto do carregador pois, como este foi desenhado especificamente para esta finalidade, não necessita de programação nem dum circuito muito elaborado para desempenhar a função. Com este integrado basta dimensionar o circuito envolvente de acordo com as equações fornecidas pelo fabricante e este desempenha todo o controlo de corrente e tensão a fornecer em cada instante.

Como este integrado traz imensas vantagens face à ideia previamente apresentada, optou-se pelo abandono da anterior em prol desta, pelo que, de seguida serão exemplificados os passos necessários ao dimensionamento do circuito.

Este integrado pode ser usado em diversos modos, sendo que um deles é o *dual level float charger*. Com uma pequena alteração ao circuito base consegue-se que este integrado controle os diversos patamares de carga atrás enumerados. Para que este trabalhe dessa forma é necessário que o circuito envolvente seja dimensionado de acordo com a seguinte Figura 3.1.3).

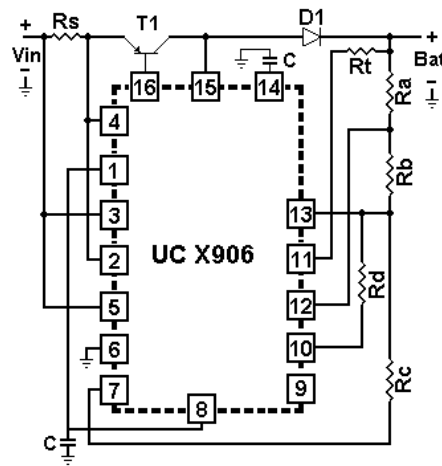


Figura 3.1.3: UC3906 num *dual level float charger* alterado

As resistências Ra, Rb, Rc, Rd, Rs, e Rt são calculadas de acordo com as seguintes expressões [46].

1. Escolher uma corrente de divisor (I_d) pertencente ao intervalo compreendido entre 50 μA e 100 μA , sendo que, neste caso, foi escolhida uma I_d de 70 μA .
2. O valor de Rc é obtido dividindo 2,3 pela I_d previamente escolhida, pelo que se obtém $R_c = \frac{2,3V}{I_d} = \frac{2,3}{70 \times 10^{-6}} = 32857 \Omega$
3. $R_a + R_b = R_{sum} = \frac{(V_f - 2,3)}{I_d}$, onde V_f é a tensão de flutuação de cada célula, multiplicada pelo número total de células. A tensão de flutuação da célula ronda os 2,275 V, como a bateria é de 24 Volt, são ao todo 12 células, portanto V_f será 27,3 Volt, donde sai que $R_{sum} = 357143 \Omega$
4. $R_d = \frac{2,3V \times R_{sum}}{V_{oc} - V_f}$, onde V_{oc} é a tensão de *overcharge* da bateria, sendo que, mais uma vez, é necessário multiplicar a tensão de *overcharge* da célula pelo número de células. Substituindo os valores previamente calculados pelas variáveis obtém-se $R_d = 456349 \Omega$
5. $R_a = (R_{sum} + R_x) \times \left(1 - \frac{2,3V}{V_t}\right)$, onde $R_x = \frac{R_c \times R_d}{R_c + R_d}$, e V_t é a tensão de *trickle* da bateria, sendo esta calculada da mesma forma que as anteriores tensões

correspondentes aos diferentes patamares, sabendo que a tensão de *trickle* da célula ronda os 1,70 V. Efectuando todos os cálculos sai que $R_a = 344071 \, \Omega$

6. Como já se calculou R_a pode-se então dimensionar R_b através de R_{sum} saindo $R_b = R_{sum} - R_a$ onde $R_b = 13071 \, \Omega$
7. $R_s = \frac{0,25V}{I_{max}}$ onde I_{max} é a corrente máxima que se pretende que o carregador conduza para a bateria, ou seja, é o valor da corrente aplicada durante *bulk charge*. Este valor não deve superar o valor recomendado pelo construtor das baterias, sendo que, neste caso o valor de corrente máxima recomendada pelo fabricante era de 2 A. Como se estava a trabalhar com baterias em paralelo o valor máximo da corrente a entregar ao banco é o resultado da multiplicação do número de baterias em paralelo pela corrente máxima de carga de cada uma delas. Como a única fonte à disposição [47] pode fornecer um máximo de 3 A essa foi a corrente máxima para a qual foi dimensionado o carregador. Daí saiu que $R_s = 0,08 \, \Omega$, o que é uma resistência muito pequena comparada com as restantes, mas que faz sentido sabendo que esta resistência serve somente para criar uma diferença de potencial aos seus terminais que desta forma permite ao integrado o controlo do andamento da carga.
8. $R_t = \frac{(V_{in} - V_t - 2,5V)}{I_t}$, onde a tensão V_{in} é a tensão de entrada do carregador que deve ser superior à soma de V_{oc} com V_{rs} . A esta tensão somam-se ainda a queda de tensão no transístor e diodo caso se opte pela colocação deste último no circuito. Neste caso o diodo foi colocado pois o carregador foi dimensionado para estar sempre conectado ao banco de baterias. Desta forma o diodo impede que a corrente flua das baterias para o carregador provocando a sua descarga. I_t é o valor da corrente de *trickle* que, recomendação do fabricante do integrado, não deve exceder os 25 mA [48]. Este patamar inicial faz uso da corrente de *trickle*, e é usado caso a bateria apresente uma tensão inferior ao nível de flutuação devido a uma descarga acima do recomendado. Esta corrente inicial, de baixo valor, serve também como protecção caso a bateria esteja danificada, impedindo que seja imediatamente fornecida uma elevada corrente a uma célula curto-circuitada o que poderia levar ao aquecimento abrupto da bateria ou a danos maiores.
9. $I_{oct} = \frac{I_{max}}{10}$, como a corrente máxima são os 3 Amperes anteriormente referidos, resulta que, I_{oct} será de 300 mA.

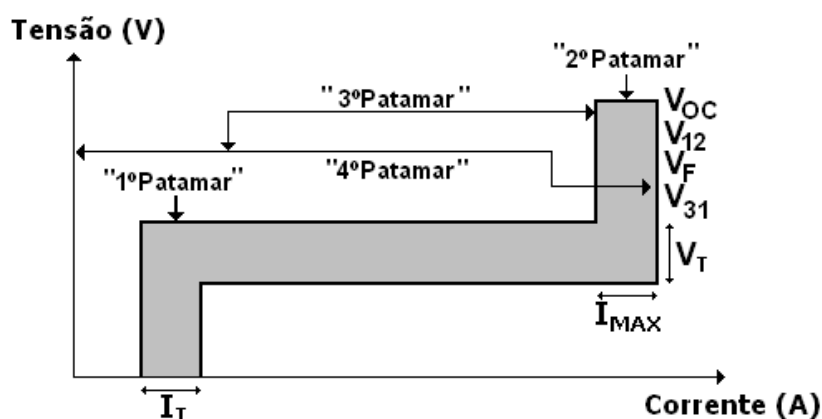


Figura 3.1.4: Representação dos diferentes patamares de carga disponíveis com a anterior configuração (fig 2.8)

Construindo o circuito de acordo com a forma indicada na Figura 3.1.3, este será o aspecto da carga efectuada pelo carregador (Figura 3.1.4). Caso o circuito não esteja de acordo com o que está presente na Figura 3.1.3 o comportamento esperado não será este, devido à existência de patamares que só surgem nesta configuração. Como tal, o nome de todos os patamares surge escrito entre aspas, pois o funcionamento deste altera consoante a configuração do integrado.

Terminados estes simples passos, tem-se o dimensionamento das resistências do circuito efectuada, ficando pendente a escolha do transístor. Este deve garantir a condução da corrente de *bulk* não exigindo muito do integrado, pois, se este tem de lhe fornecer uma elevada corrente de polarização acaba por aquecer prejudicando assim a leitura da temperatura ambiente, o que impede que a compensação de temperatura seja correctamente efectuada. Somente a título de curiosidade, o transístor escolhido para o carregador construído foi o BDV66D [49]. Caso o carregador tenha de acompanhar sempre o banco de baterias então deve ser adicionado um díodo em série, como se pode observar na Figura 3.1.3, que garante a não reversibilidade da corrente.

Como se pode observar pela simplicidade do dimensionamento do circuito, este integrado permite que se construa um carregador inteligente de uma forma bastante simples. Como é óbvio, tanta facilidade tem um preço, e no caso deste circuito, esse custo vem sob a forma de calor. O circuito é um carregador linear, o que significa que, a corrente está sempre a fluir para a bateria, o que faz com que o transístor e o díodo aqueçam quando se encontra em *bulk charge*, que é o patamar onde é usada a corrente máxima. Este efeito faz com que seja necessário um dissipador de calor no transístor e díodo, caso este exista, de forma a garantir a integridade dos mesmos. Para fazer uma boa escolha deve-se calcular a potência que o transístor irá conduzir no caso extremo e ver no catálogo do mesmo as suas propriedades térmicas. Com esses dados pode-se calcular a área de dissipador necessária para escoar o calor gerado.

Como o robot é um trabalho em constante evolução, existem alterações constantes ao projecto, sendo que, o banco de baterias também sofre alterações ocasionais. Dessa forma foi desenvolvido um programa informático que é capaz de executar os 9 passos anteriormente referidos e assim dimensionar as resistências agilizando o processo quando necessário. O programa tem o aspecto demonstrado na figura 3.1.5.

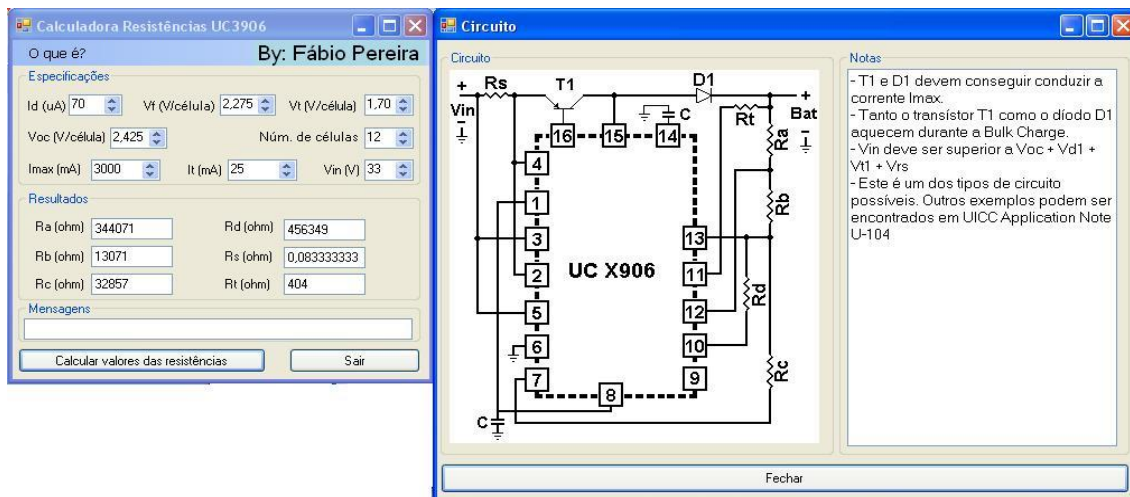


Figura 3.1.5: Dimensionador de resistências para UC3906

Ao abrir o programa surge a caixa intitulada, “Calculadora Resistências UC3906” na qual o utilizador é convidado a inserir os valores para os quais deseja dimensionar o circuito. Como se pode visualizar pela figura 3.1.5, os valores por defeito são os utilizados neste estudo. Após inserção dos valores pretendidos basta pressionar o botão “Calcular valores das resistências” que aparece a caixa intitulada “circuito”, onde surge o esquemático do circuito e algumas notas relevantes para o desenho e construção do mesmo. Ainda na caixa da esquerda existe um campo mensagens que vai dando *feedback* ao utilizador caso este pressione o botão “Calcular...” sem que os valores inseridos façam sentido. Consoante os diversos casos a mensagem que aparece vai alterando de modo a esclarecer o utilizador para o erro do seu dimensionamento. Junto ao cabeçalho existe ainda um botão intitulado “O que é?” que dá uma breve explicação sobre o que o programa faz. Com este programa foi deixado um pequeno contributo à empresa, que pode, ou não, vir a ser útil, mas que é algo que valoriza o trabalho desenvolvido.

3.1.3 Construção de carregador Mk1

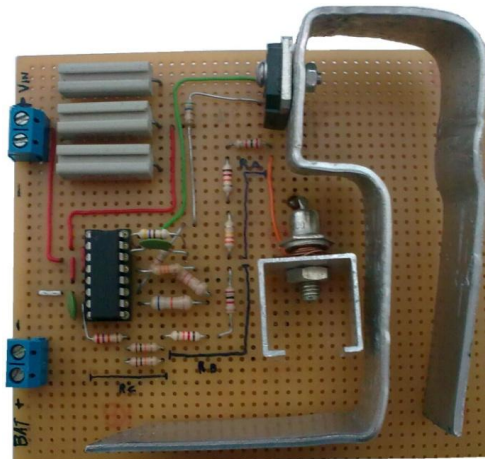


Figura 3.1.6: Protótipo provisório do carregador de baterias

Na figura 3.1.6 é possível visualizar o aspecto do primeiro carregador construído. Como é relativamente óbvio, esta não foi a solução apresentada para implementar no robot, pelo que foi construído somente para teste de conceito e procura de falhas no dimensionamento eléctrico. De notar que, por ser uma versão de teste, não houve cuidado com o *design* daí que apareçam estas chapas metálicas de forma irregular e que estavam a servir como dissipadores térmicos.

Como este protótipo provou ser funcional e ter um comportamento eléctrico que ia de encontro ao que era esperado, avançou-se para a construção da versão final do mesmo que se pretendia mais resistente e fiável. De modo a garantir ambas decidiu-se construir a placa de raiz ficando assim menos susceptível a falhas mecânicas pois o robot encontra-se dimensionado para percorrer terrenos acidentados.

3.1.4 Construção do carregador Mk2

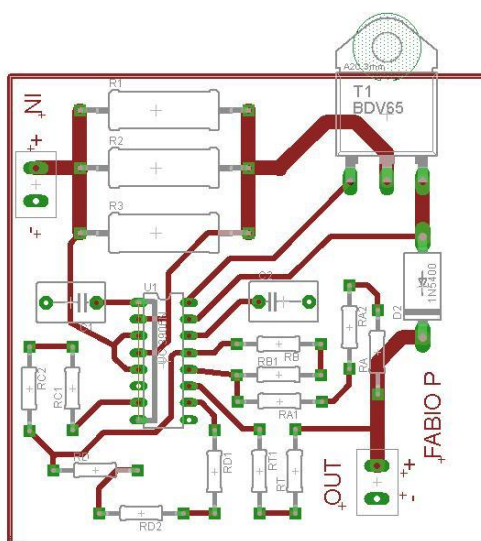


Figura 3.1.7: Desenho da versão final da placa

Usando o software Eagle® da cadsoftusa® desenhou-se o circuito, de face única, de modo a exportar o ficheiro que contém as coordenadas das pistas e dos buracos e que será posteriormente lido pela fresadora [50]. (Figura 3.1.7).



Figura 3.1.8: Construção da placa de circuito impresso

A fresadora [50] vai recebendo as coordenadas, enviadas pelo diagrama eléctrico presente na figura 3.1.7, e estas provocam um deslocamento tridimensional de um braço que tem acoplada uma ferramenta rotativa semelhante a um berbequim. Esta ferramenta está equipada com uma bucha onde se colocam as pontas consoante a finalidade do trabalho que se está a desempenhar. Neste caso a placa estava numa fase inicial pelo que tinha a ponta destinada à fresagem que, ao retirar a camada de cobre, forma uma barreira isolante por onde passa. Após término do processo de fresagem obtém-se uma placa com as pistas desenhadas ficando a faltar a furação por onde irão entrar os respectivos pinos dos componentes eléctricos. Para tal, é necessário substituir a ponta de fresagem por uma broca com diâmetro de acordo com os pinos dos componentes que irão ser utilizados e iniciar o processo de furação.

Terminada a furação passa-se ao recorte da placa ficando a faltar somente a soldagem dos componentes. O resultado final visualizado na figura 3.1.9.

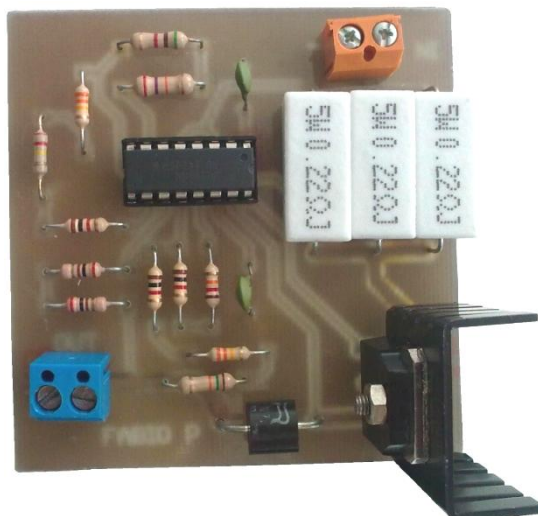


Figura 3.1.9: Versão final do carregador de baterias

3.1.5 Alimentação do circuito carregador de baterias

O carregador de baterias foi dimensionado para ser alimentado a 32 V DC pelo conversor tal como pode ser visto na figura 3.0.2, no entanto a compra desse conversor está pendente da finalização da estação de carga sem contacto pelo que, actualmente recorre-se a uma outra solução para a alimentação. Como tal faz-se uso de uma fonte do tipo “DC POWER SUPPLY PS23023” que, na realidade é um conjunto de três fontes onde uma das quais é fixa a 5 V e tem capacidade para fornecer 3 A enquanto que, as restantes duas podem ser ligadas em série ou paralelo, sendo que para atingir os 32 V necessários para o correcto funcionamento do carregador é necessário fazer a série das mesmas como se pode verificar na figura 3.1.10.

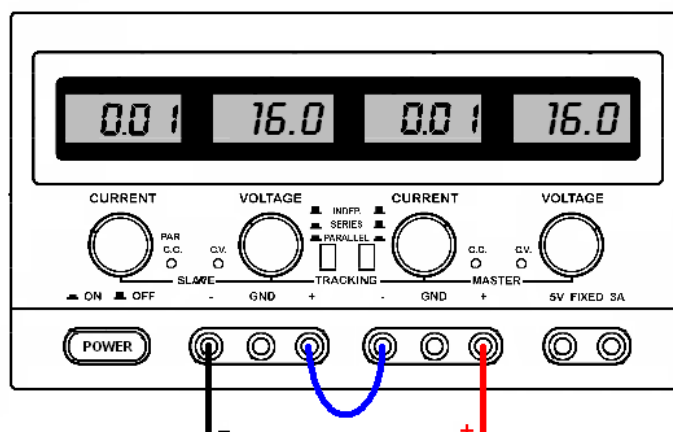


Figura 3.1.10: Fonte de tensão com ligação série

Para se conseguir alimentar o carregador com 32 V a partir desta fonte de tensão é necessário fazer a ligação entre a fonte *slave* e *master* através do fio indicado a azul que, ao conectar o terminal positivo da *slave* ao negativo da *master*, faz a série das mesmas. Além dessa ligação, é também necessário usar os botões de *tracking* na posição indicada como *SERIES*, ou seja, o botão esquerdo em posição de activo e o directo em inactivo. Através desta configuração a fonte *master* passa a controlar a fonte *slave*, tornando possível obter os 32 V usando o respectivo botão *voltage* para regular a tensão até que nos respectivos *displays* apareça 16,0, como representado na Figura 3.1.10.

3.1.6 Circuito de descarga de baterias

Agora que já se tem um circuito destinado à carga das baterias é necessário um circuito que desempenhe a função inversa, e que seja construído de forma a possibilitar a obtenção de informação do comportamento destas durante esta parte do ciclo.

Após troca de ideias com um dos colegas da Holos S.A. e olhando para o material disponível, chegou-se à conclusão de que o circuito aqui exemplificado era o que melhor servia o propósito.

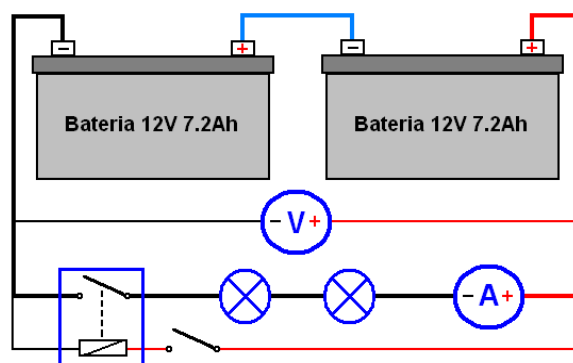


Figura 3.1.11: Circuito de descarga das baterias

A corrente de descarga flui através do amperímetro e das duas lâmpadas de 12 V, destinadas aos faróis dianteiros de automóveis, [51] montadas em série, atravessando por fim o relé. Este era o circuito original mas, de modo a obter valores com uma maior precisão, passou-se a alimentar a bobina do relé com uma outra bateria, sendo que desta forma a corrente necessária para fechar o circuito não está a ser extraída das baterias em questão não adulterando desta forma o resultado da descarga. A título de curiosidade, a corrente responsável pelo fecho do relé que controla o circuito principal é 10,9 mA o que, numa corrente de 5 A é desprezável, mas como existem baterias de sobra optou-se pelo uso desta montagem tendo ainda a vantagem de permitir uma descarga profunda às baterias sem que o relé [52] abra o circuito por falta de tensão aos terminais da sua bobina. O andamento da tensão ao

longo da descarga é monitorizado através do uso de um voltímetro em paralelo com a instalação (Figura 3.1.12).

As lâmpadas em questão têm dois níveis de potência pois são do tipo H4, o que significa que a mesma lâmpada é composta por dois filamentos, onde um acende quando o comutador está em posição de luzes de cruzamento, vulgo médios, enquanto que o outro é destinado às luzes de estrada, vulgo máximos.

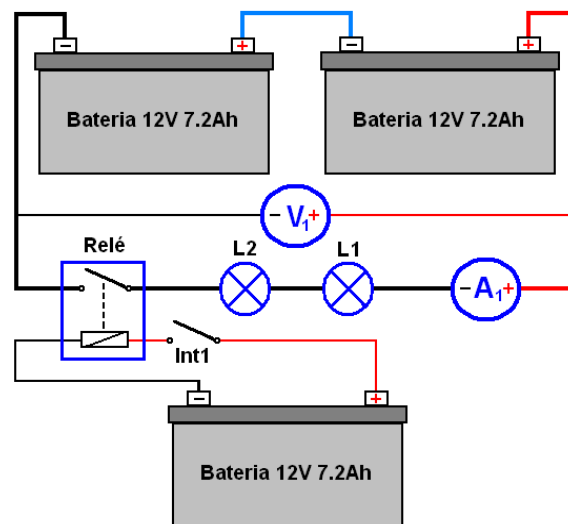


Figura 3.1.12: Diagrama eléctrico do novo circuito de descarga das baterias

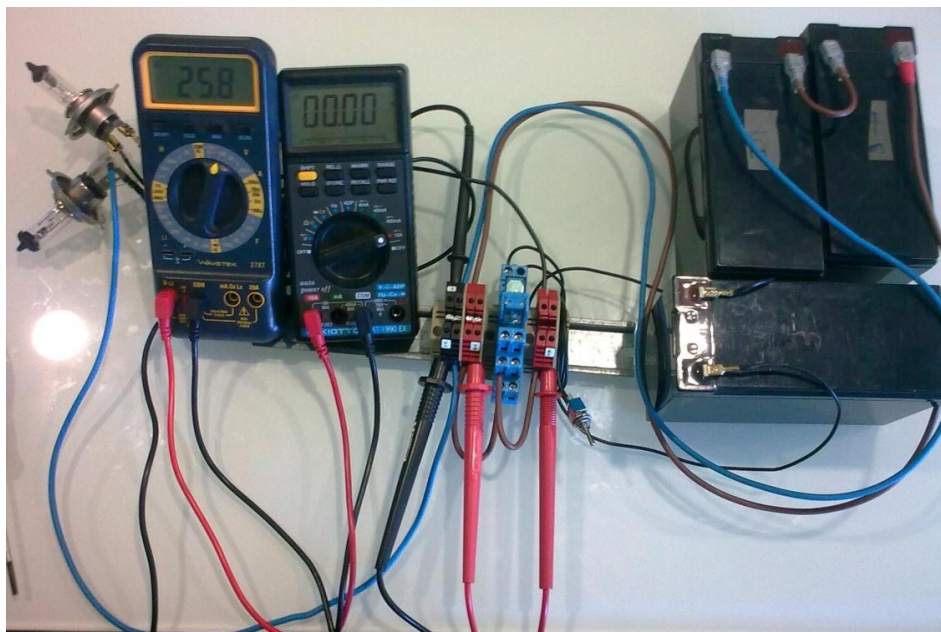


Figura 3.1.13: Circuito real de descarga de baterias

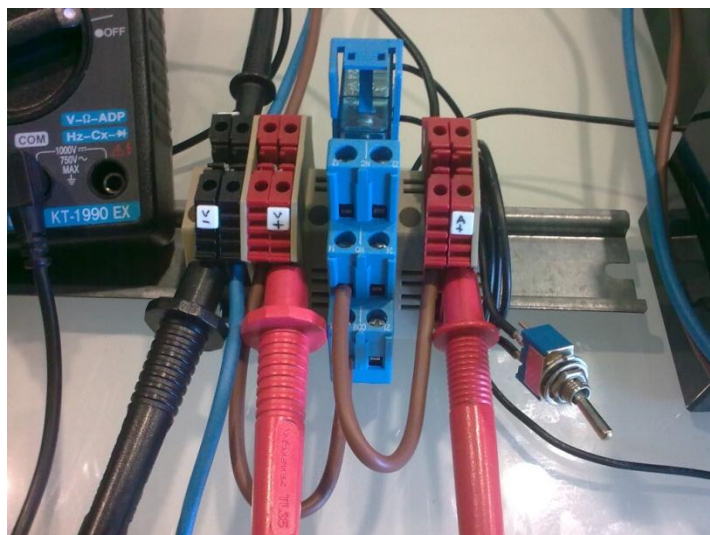


Figura 3.1.14: Detalhe do circuito de descarga de baterias

Faz-se de seguida uma breve descrição da figura 3.1.13, onde se pode ver o circuito montado. Começando da esquerda é possível identificar as duas lâmpadas já referidas, o multímetro em função de voltímetro, o multímetro em função de amperímetro, e a calha DIN [53] onde podemos encontrar os bornes de conexão [54], o relé, e o interruptor. Seguindo para a direita, identificam-se três baterias, duas das quais conectadas em série para totalizar os 24 V, enquanto que a restante bateria serve para alimentar o circuito do relé.

Na figura 3.1.14 é possível verificar a calha DIN com maior detalhe. Os bornes de conexão encontram-se devidamente etiquetados para facilitar a ligação dos aparelhos de aquisição de dados. É também visível o interruptor a azul que é responsável pelo comando do relé que por sua vez abre e fecha o circuito principal.

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

4 Resultados obtidos

Neste capítulo são descritos os resultados obtidos ao longo dos testes realizados, efectuando em simultâneo um confronto com os conhecimentos adquiridos com o estudo dos conceitos atrás descritos.

4.1 Resultados obtidos com a descarga

De acordo com o fabricante das baterias, este (Gráfico 4.1.1) deveria ser o aspecto das curvas características da descarga a 25 °C. Pode-se também verificar que as 20 horas anunciadas na capacidade são atingidas através de uma descarga constante impondo uma corrente de 0,36 A. Como se pretendia que a descarga da bateria não fosse tão demorada foi imposta uma carga com um consumo superior de forma a elevar a corrente de descarga, aumentando assim o ritmo a que esta está a descarregar.

A carga usada foram duas lâmpadas de automóvel em série, tendo um consumo máximo de 60 W cada. Desta forma a montagem totaliza um consumo que ronda os 120 W. A bateria é composta por duas baterias de 12 V em série, pelo que, irão surgir 24 V aos terminais das lâmpadas. Usando uma simples fórmula pode-se calcular o valor da corrente que as baterias irão fornecer.

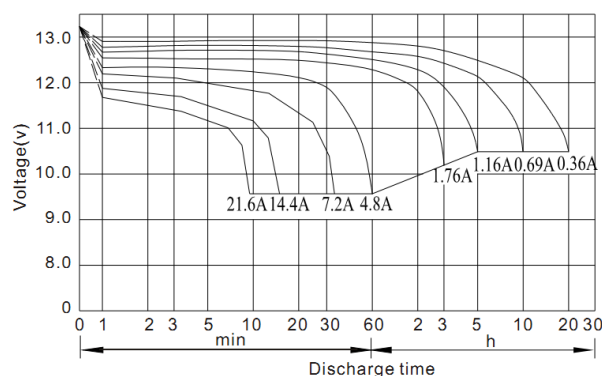
$$P = U \times I \quad (4.1)$$

pelo que, substituindo pelos valores acima indicados:

$$I = \frac{120}{24} = 5 \text{ A} \quad (4.2)$$

Como se acabou de calcular, o valor da corrente ronda os 5 A. A estimativa foi feita um pouco por cima, pois, como se viu, a tensão da bateria tem flutuações e quando se encontra carregada está acima dos 24 V baixando assim o valor da corrente. Uma outra razão para que a corrente seja inferior aos 5 A é a potência das lâmpadas, pois admitiu-se como sendo 60 W que é o valor máximo indicado pelo fabricante das mesmas.

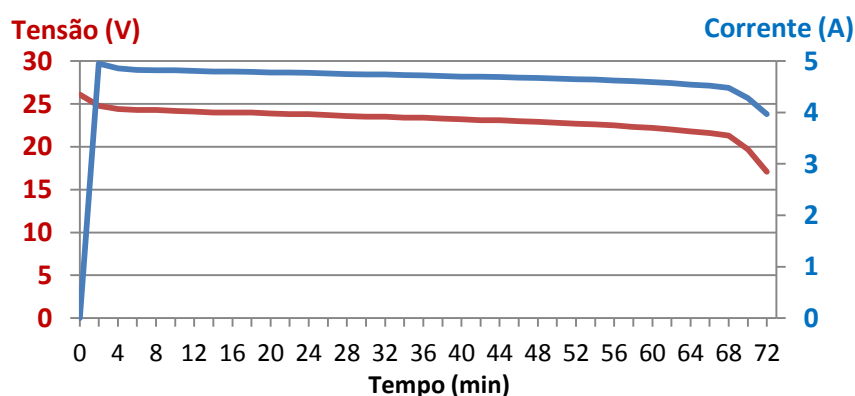
Gráfico 4.1.1:Curvas características da descarga a 25°C [34]



Consultando o gráfico 4.1.1, sabendo que a corrente esperada será um pouco inferior aos 5 A, consegue-se retirar que a capacidade das mesmas garante a alimentação do circuito durante 60 minutos. Este é, mais uma vez, um valor aproximado, pois é influenciado por todos os factores até aqui referidos. Um outro facto que é curioso, e pode ser verificado neste gráfico, é a tensão a que o fabricante considera que a bateria está descarregada. Como facilmente se verifica para correntes mais baixas, inferiores a 1.16 A, a tensão admitida como tensão de corte situa-se nos 10.5 V, já na faixa de correntes compreendidas entre os 4,8 e 21.6 A, essa tensão desce para os 9.5 V. Esta curva, calculada pelo fabricante, e indicativa do final da descarga, corresponde ao nível onde o S.O.C é considerado nulo (0 %). Este facto vai de encontro ao previamente descrito no subcapítulo 2.7.2, e deve-se à relação existente entre a resistência interna e a corrente que a bateria está a fornecer. O fabricante dimensionou esta bateria para fornecer um fluxo de corrente ao longo dum determinado período de tempo, a saber 0,36 A durante 20 horas, no entanto esta consegue fornecer correntes superiores apesar de não se encontrar optimizada para os mesmos. Como tal, a correntes superiores, o efeito destas sobre a resistência interna deve ser calculado, resultando na nova tensão de corte aqui indicada como 9.5 V (Gráfico 4.1.1). O circuito foi construído através da ligação de duas baterias em série pelo que a tensão de corte será 19 V e, como descrito no subcapítulo 2.10, a capacidade total será igual à capacidade de cada uma, ou seja, 7,2 Ah. Portanto, a curva de descarga esperada deverá ser idêntica à curva referente aos 4,8 A presente no gráfico 4.1.1 sendo que agora termina em 19 V. Como a capacidade da série de baterias que aqui se analisa é igual à capacidade da bateria testada pelo fabricante resulta que o tempo necessário para a descarga deste conjunto deverá ser aproximado aos 60 minutos indicados no gráfico 4.1.1.

No gráfico 4.1.2 é descrito o comportamento real do conjunto de baterias usadas.

Gráfico 4.1.2: Andamento da tensão e corrente ao longo da descarga



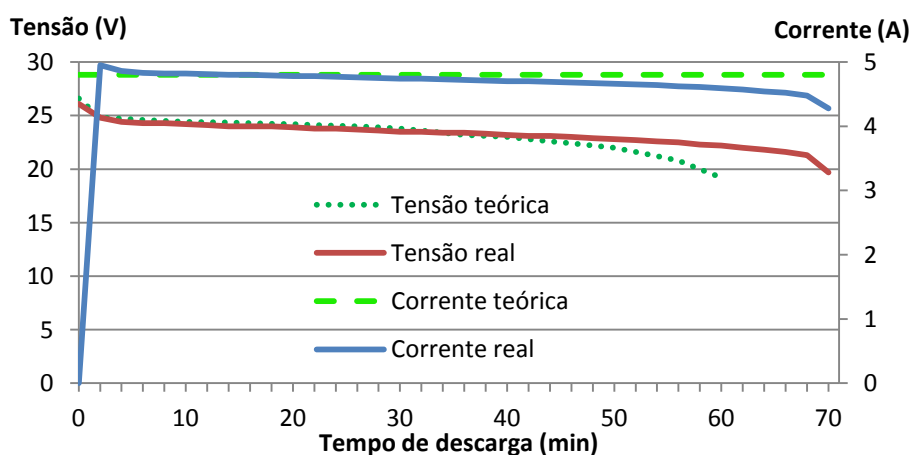
Como se pode observar no gráfico 4.1.3, onde aparece uma comparação entre os parâmetros medidos e os esperados, a descarga da bateria durou 70 minutos, ou seja, estendeu-se por mais 10 minutos do que o previsto (60 minutos a 4,8 A). Isto deve-se ao facto de grande parte da descarga ter sido efectuada com uma corrente um pouco inferior aos 4,8 A.

No entanto, durante o intervalo em que os valores da corrente teórica e prática eram semelhantes, também as curvas esperadas e obtidas se aproximavam, o que indica que as baterias aqui testadas se comportaram de acordo com o esperado. De forma a estimar o estado em que as baterias se encontram é necessário confirmar o valor da capacidade obtida. Para tal é necessário fazer um simples cálculo e comparar de seguida o resultado obtido com o anunciado pelo fabricante. O valor médio da corrente ao longo da descarga foi de 4,70 A, e esta demorou cerca de 70 minutos a atingir os 19 V*, que, tal como indicado pelo fabricante na Tabela 4, é o ponto onde a descarga deve ser terminada quando esta é efectuada com este valor de corrente. A capacidade é a quantidade de energia que a bateria forneceu sendo esta o valor do integral da corrente ao longo da descarga que totalizou 5,62 Ah em 1,17 horas (corrente média de 4,715 A). Este cálculo pode ser feito duma forma menos precisa aproximando a forma a um simples quadrado. Assim para obter a área do mesmo basta multiplicar a corrente média (4,715 A), pelos 70 minutos (1,17 horas) resultando em 5,52 Ah. Estes valores situam-se no intervalo esperado [4,8 – 5,8] Ah, estando no entanto mais próximos do valor correspondente a uma descarga de 5 h. Tal não era esperado, o normal seria uma capacidade um pouco menor uma vez que a descarga foi efectuada a uma corrente média de 4,715 A e as baterias já eram usadas. Este facto indica que estas foram correctamente utilizadas ao longo da sua vida e que se encontram ainda num bom estado de conservação.

Tabela 4: Capacidade em função da corrente de descarga [34]

Duração da descarga	Capacidade nominal a 25°C	Corrente de descarga	Valor de tensão de corte
20 h	7.2 Ah	0.36 A	10.5 V
10 h	6.9 Ah	0.69 A	10.5 V
5 h	5.8 Ah	1.16 A	10.5 V
1 h	4.8 Ah	4.8 A	9.5 V

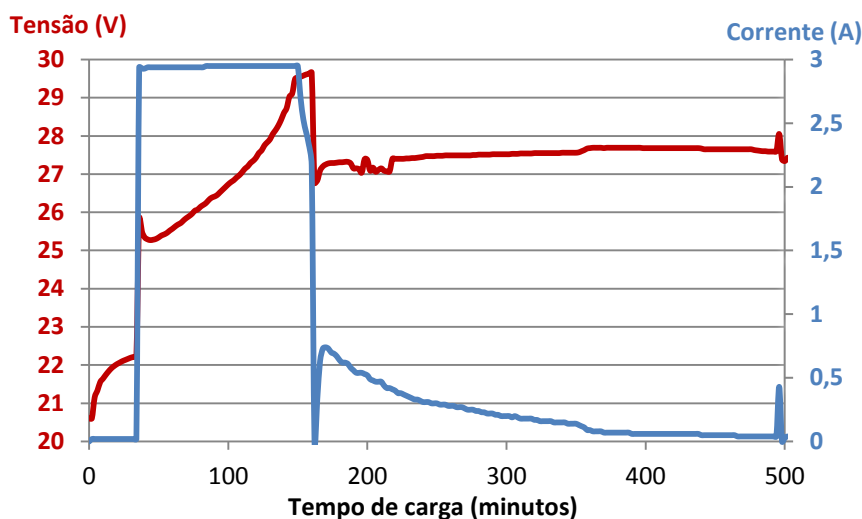
Gráfico 4.1.3: Parâmetros da descarga (Real vs Teórico)



*Os 19 V dizem respeito à tensão obtida pela série de duas baterias (com 9,5 V cada)

4.2 Resultados obtidos durante a carga

Gráfico 4.2.1: Evolução da tensão e corrente ao longo da carga



No gráfico 4.2.1 é possível ver de que forma a tensão e a corrente evoluíram ao longo da carga. Como se pode verificar o carregador começou por impor uma corrente baixa (*trickle charge*) até que a tensão atingisse o primeiro patamar, tal como descrito na figura 3.1.4. De seguida iniciou a segunda fase da carga, denominada por *bulck charge*, onde a bateria já se encontra internamente preparada para receber carga ao ritmo máximo. Este patamar perdura até ser atingida uma determinada tensão, sugerida pelo fabricante como indicativa de que a célula se encontra próxima do seu limite de carga. Daqui em diante esse limite deve ser atingido através duma aproximação mais lenta, devendo para isso ir baixando o ritmo de carga de uma forma progressiva à medida que este se aproxima.

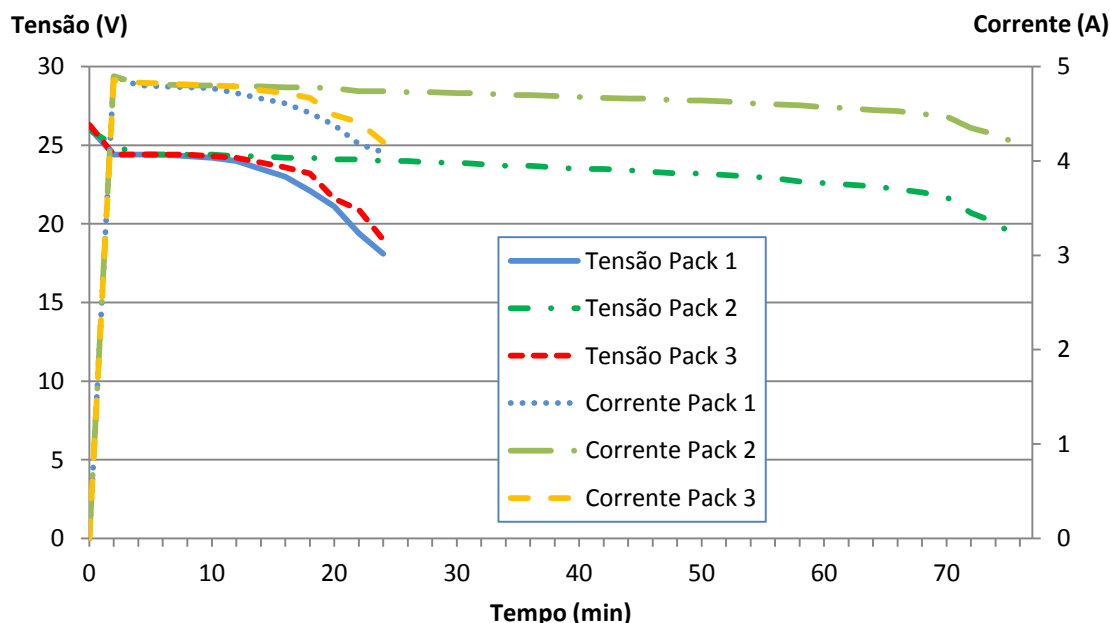
Num comportamento cíclico correctamente executado, onde não se ultrapassam os limites mínimos de carga da bateria, o primeiro patamar de carga aqui representado dura pouco tempo, sendo quase inexistente. Neste caso prolongou-se por cerca de 36 minutos porque a bateria foi propositadamente descarregada em demasia de forma a testar o comportamento do carregador nesta fase de carga.

4.3 Impacto da descarga profunda

O processo de descarga da célula causa sulfatação sendo que esta é revertida aquando da carga. No entanto, quando a célula é demasiado descarregada a sulfatação ultrapassa os níveis normais para os quais a célula se encontra dimensionada e torna-se assim parcialmente, ou totalmente, irreversível. Traduzindo noutros termos, a bateria perde capacidade pois parte da área dos electrodos fica permanentemente coberta por sulfato e portanto impossibilitada de reagir com o electrólito. Numa tentativa de medir o impacto que este fenómeno tem nas

características da bateria apresenta-se o gráfico 4.3.1 onde são confrontados os valores de corrente e tensão relativos a três conjuntos (*Pack*) de baterias testados.

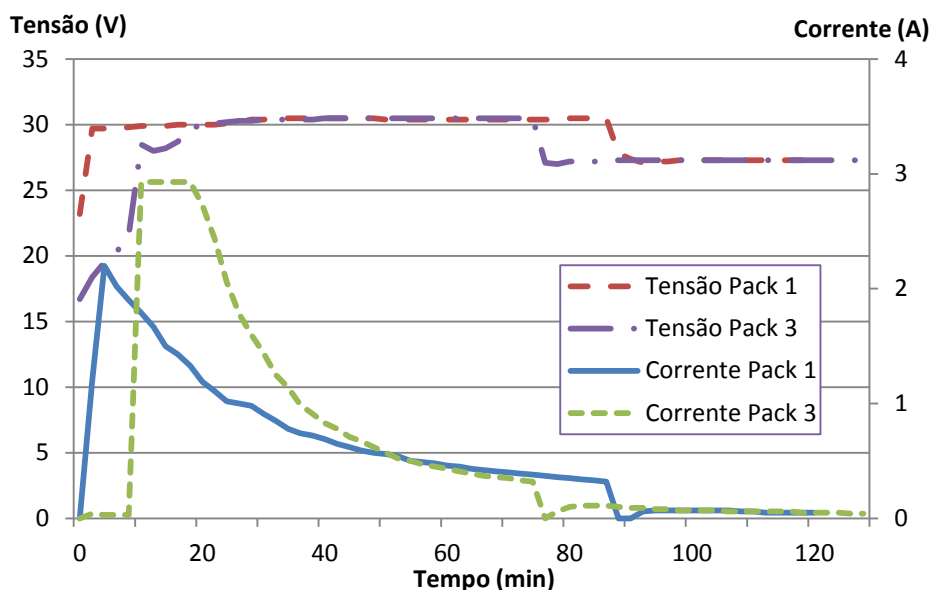
Gráfico 4.3.1: Descarga de baterias



Os três *packs* são compostos pela série de duas baterias de marca e modelo iguais, no entanto através da observação do gráfico 4.3.1 constata-se que o *pack 2* alimenta a carga por muito mais tempo que os restantes. Esta diminuição do tempo, indicativa de que a bateria perdeu capacidade face à inicial, deve-se ao facto de que os *packs 1* e *3* foram propositadamente sujeitos a descargas profundas. Esta diminuição de 2/3 da capacidade aqui demonstrada diz respeito a três ciclos incorrectamente efectuados, onde se deixou que a bateria continuasse a alimentar a carga mesmo após o limite mínimo de tensão indicado pelo fabricante. Deste modo prova-se que as descargas profundas retiram capacidade à bateria podendo inclusivamente criar um curto-circuito interno à bateria ficando a mesma inutilizada.

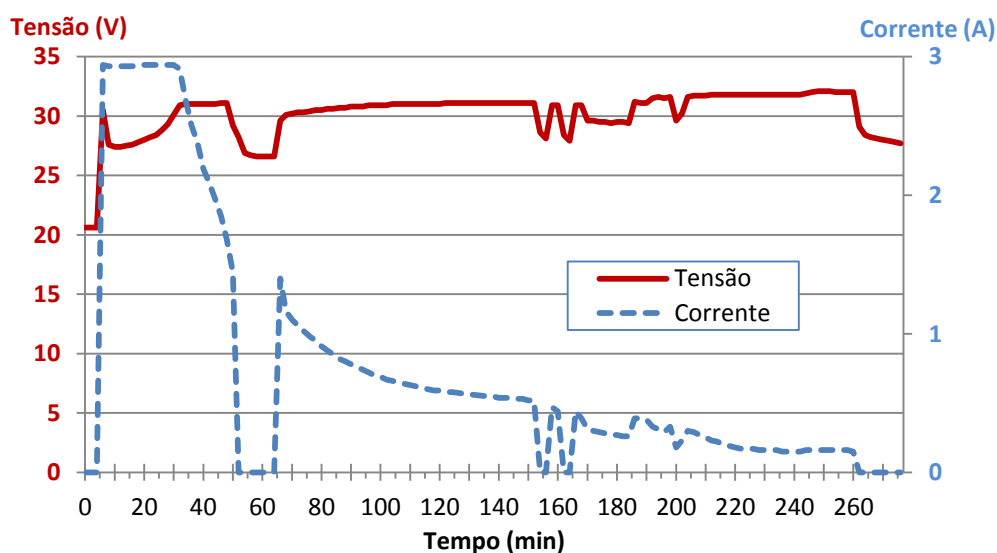
Esta diminuição da capacidade tem o seu maior impacto na fase de descarga pois o utilizador vai-se apercebendo que a bateria deixa de conseguir alimentar a carga durante o intervalo de tempo coberto inicialmente. No entanto, durante a carga também é possível verificar comportamentos anormais que indicam que a bateria se encontra degradada. No gráfico 4.3.2 é possível visualizar a evolução da tensão e corrente ao longo do processo de carga de dois *packs* que foram anteriormente sujeitos a descargas profundas.

Gráfico 4.3.2: Carga de packs danificados



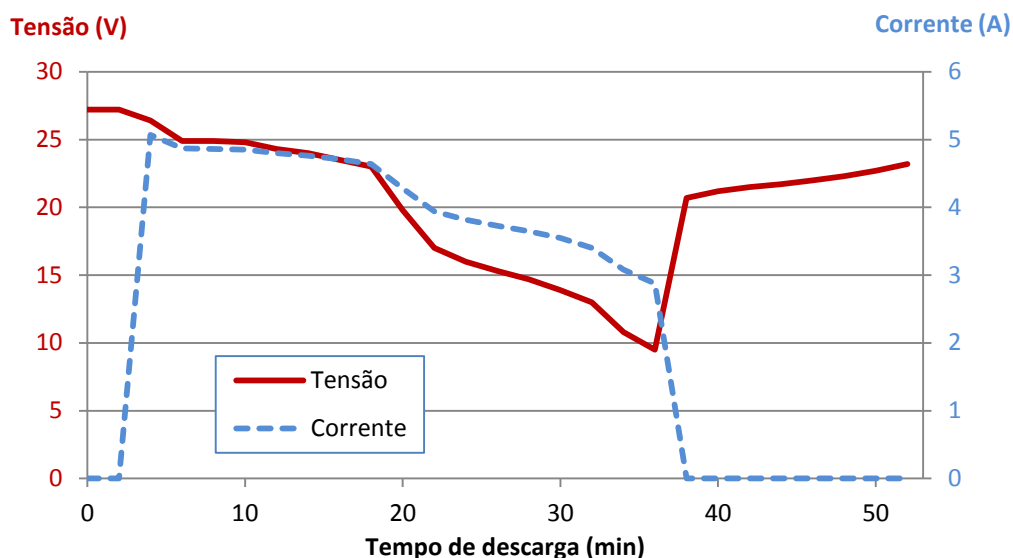
Comparando o comportamento descrito no gráfico 4.3.2, onde se descreve o processo de carga de baterias que sofreram descargas profundas, com o descrito no gráfico 4.2.1 onde se descreve o comportamento habitual destas baterias anteriormente a esse tipo de descargas, torna-se fácil compreender que as bateria, após sofrerem este tipo de descargas, passam a não conseguir armazenar tanta energia como armazenavam anteriormente.

Gráfico 4.3.3: Carga do pack 1



No gráfico 4.3.3 descreve-se uma nova carga ao pack 1, posterior à descrita no gráfico 4.3.2. Neste último caso, e excluindo as quebras visíveis, o comportamento da bateria aparenta ser mais próximo ao inicial, o que poderia indicar que a bateria teria recuperado com os ciclos correctamente efectuados. No entanto, os ciclos posteriores foram também eles registados verificando-se que esse facto não passava de uma suposição.

Gráfico 4.3.4: Descarga pack 1



No gráfico 4.3.4 está descrita uma nova descarga ao pack 1. Observando este gráfico percebe-se imediatamente que as baterias têm uma capacidade bastante inferior à original, pois esgotam a sua carga em metade do tempo. Desta forma verifica-se que as baterias não conseguiram recuperar a anterior capacidade, sendo que a capacidade que é perdida aquando das descargas profundas já não volta a ser reposta.

4.4 Alteração das baterias do robot

O projecto do robot está em constante desenvolvimento e como tal, enquanto este estudo decorria, houve substituição do banco de baterias do robot, tendo tornado possíveis as descargas profundas a algumas das anteriores baterias, pois este tipo de acção degrada as mesmas irremediavelmente. O novo banco de baterias é composto por duas baterias Eurocell Extreme SLA de 12 V e 45 Ah em série, o que, como já se viu, equivale a uma bateria de 24 V e 45 Ah.

Como as baterias novas são do mesmo tipo das anteriores, todos os testes efectuados até então também se aplicam nestas, sendo que, desta forma se aproveitam as anteriores baterias para efectuar estudos em bancada sobre o comportamento das mesmas evitando comprometer o funcionamento do robot durante os testes. Desta forma, o conhecimento inicial foi adquirido com as baterias antigas usando depois esse mesmo conhecimento para descrever o comportamento das baterias novas, e assim conseguir estimar a autonomia do robot.

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

5 Implementação

Tendo presente a informação relativa a alguns dos métodos utilizados para adquirir informação sobre o S.O.C e o S.O.H da bateria passa-se ao uso da mesma no desenho de uma aplicação a instalar no robot e que permita ao utilizador saber em que estado se encontra a bateria.

O S.O.H fornece ao utilizador informação sobre o estado de conservação da bateria, ou seja, mede as características actuais da bateria e, por comparação dessas mesmas características com as iniciais, dá uma indicação da degradação que a bateria sofreu com o seu uso. Como tal, para este cálculo torna-se necessário consultar as folhas técnicas das baterias para saber as suas características enquanto novas e deste modo comparar com as características actuais e daí retirar as devidas conclusões. Desta forma surge um problema, pois, foi impossível encontrar informação sobre as baterias. Foram inclusivamente efectuadas deslocações ao revendedor das mesmas que não tinha em sua posse as folhas técnicas das mesmas. Desta forma, e devido a outros parâmetros arquitecturais do robot, não foi possível implementar um sistema capaz de calcular o S.O.H duma forma directa.

O S.O.C é uma indicação da quantidade de carga presente na bateria e que se torna útil na medida em que fornece ao utilizador, ou ao próprio robot, informação sobre o nível de energia restante permitindo assim um melhor planeamento do percurso e garantindo a energia necessária para regressar à base. Como referido no sub-capítulo 2.7, existem diversos métodos para se obter informação sobre este parâmetro sendo possível, através de alguns deles, calcular este mesmo parâmetro sem conhecer todos os dados técnicos da bateria e como tal foi possível desenhar e implementar este sistema no robot.

5.1 Descrição do sistema

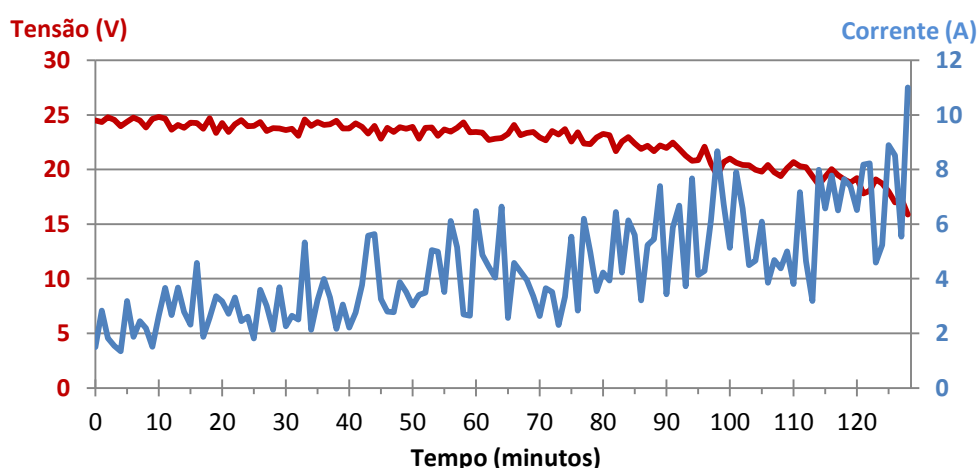
O robot dispõe duma placa de aquisição de dados [55] que é responsável pela leitura dos valores da tensão e corrente que estão a ser consumidas em cada instante. Deste modo, torna-se possível utilizar a capacidade de processamento do robot para processar os dados recebidos e assim retirar conclusões.

A arquitectura presente no robot leva a que esta placa seja usada somente para medição de valores, tendo depois a itx, que é o “cérebro” do robot, de analisar e processar os dados. Desta forma, para garantir o seguimento das características das baterias tem-se forçosamente de ter o robot ligado para processamento dos dados. Assim o sistema que aqui descrito funciona sem qualquer tipo de informação sobre as baterias durante todo o processo de arranque do computador, bem como dos processos de carga que são efectuados com o robot desligado. Devido a esta carência de informação durante esses ciclos, excluem-se outros dois métodos de aquisição de informação sobre a bateria (*coup de fouet* 1.2.3 e integração de

corrente 1.2.4 e 2.7.3), um porque se baseia no comportamento da bateria durante o arranque, e outro porque necessita de um acompanhamento da corrente, seja ela de carga ou descarga. Assim sendo restam o teste convencional sobre cargas artificiais (1.2.1) que, como já se referiu, não serve este caso pois vai contra os requisitos do projecto ao exigir que as baterias deixem de alimentar o robot para alimentar uma resistência conhecida e assim permitir uma análise do seu comportamento, o teste da medição da resistência interna usando método AC e DC (1.2.2) que, também já referido, exige equipamento sensível e específico que não se encontra a bordo do robot e como tal é também excluído. Existe ainda o uso de baterias inteligentes (1.2.5), a medição da gravidade específica (2.7.1) e acompanhamento da tensão (2.7.2). Os dois primeiros são automaticamente excluídos pois as baterias utilizadas no robot são convencionais seladas e como tal não permitem o acesso ao electrólito nem dispõem de qualquer tipo de equipamento electrónico que faça um seguimento da carga, o que nos limita ao teste que calcula o S.O.C através do acompanhamento da tensão da bateria. Assim sendo, a base de funcionamento da aplicação construída é a evolução da tensão aos terminais da bateria que, neste caso em específico e devido a características inerentes à arquitectura do robot, será complementada pelo andamento da corrente.

O teste por medição da tensão (2.7.2) é um dos mais simples de executar no entanto, quando utilizado a sós, torna-se muito vago não dando uma indicação muito precisa do que realmente acontece. Desta forma, após análise de diversos ciclos percebeu-se que, neste caso em particular e devido ao uso de conversores DC/DC, este se poderia complementar com um acompanhamento da corrente. De seguida apresenta-se um gráfico correspondente a uma descarga do robot onde é possível ver as características que levam a que estes métodos possam ser usados em conjunto de forma a melhorar a precisão da estimativa.

Gráfico 5.1.1: Descarga das novas baterias do robot



Como é possível verificar no gráfico 5.1.1, a corrente média vai aumentando à medida que a tensão vai descendo, este efeito deriva da necessidade em manter constante a potência fornecida aos equipamentos a jusante do conversor. Como a corrente tem um andamento que depende da tensão então esta pode ser também usada para determinar em que ponto da

descarga é que a bateria se encontra. Assim sendo, a implementação do sistema de cálculo de autonomia presente no robot resulta da soma destes dois métodos, onde a média do andamento da corrente complementa os valores de tensão de forma a atingir-se uma maior precisão na medição da capacidade restante.

O sistema foi testado e como o comportamento após testes foi considerado satisfatório encontra-se implementado e activo, bastando ao utilizador abrir a aplicação *ServRobot* [23] e de seguida clicar em *Batteries* para ficar a conhecer a capacidade restante estimada (Figura 5.1.1).

O sistema foi desenhado para filtrar as flutuações presentes na tensão e corrente de forma a garantir que o valor da capacidade tem uma tendência constante e não varia com os picos de tensão e corrente. Desta forma não é possível mostrar a autonomia das baterias no instante em que a aplicação *ServRobot* é aberta, aparecendo a normal caixa da autonomia, mas que no seu interior ao invés do valor da capacidade contém N/D, tendo o utilizador de esperar, no máximo 1 minuto, para que os valores sejam filtrados e a aplicação retorne o valor da capacidade. De modo a proporcionar uma rápida leitura da capacidade e dar ênfase aos diferentes níveis de energia, o valor da capacidade aparece inserido numa caixa que vai alterando de cor à medida que a bateria vai descarregando, começando pelo verde até atingir os 35% onde passa para amarelo e terminando em vermelho para valores iguais ou inferiores a 15%. Durante a construção do software foi considerada a opção de indicar o tempo restante que a bateria consegue alimentar o robot, mas devido ao erro e ao aumento da complexidade do sistema associado a esse cálculo, optou-se pela apresentação da capacidade em forma de percentagem.

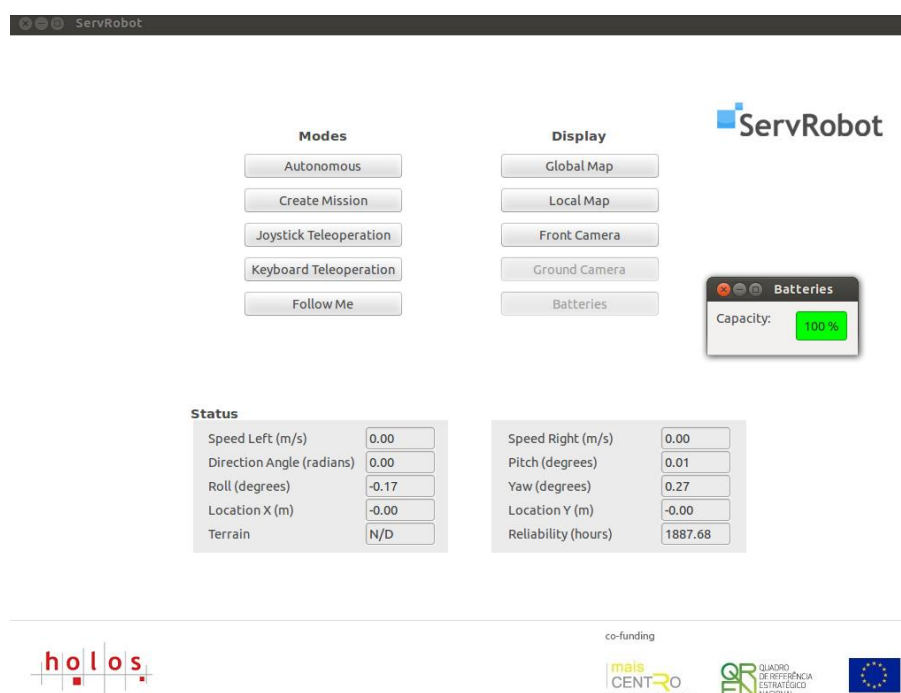


Figura 5.1.1: Aspecto da aplicação da capacidade sobre a aplicação base ServRobot

A figura 5.1.1 mostra o aspecto da aplicação base *ServRobot* com a chamada da aplicação da capacidade que surge na caixa intitulada *Batteries*. Neste caso a descarga estava ainda numa fase inicial e como tal a capacidade indica 100% de carga com um fundo verde. Outros exemplos de valores de capacidade restante são mostrados de seguida, onde se verifica um maior ênfase aos diferentes patamares de carga consoante a cor apresentada.

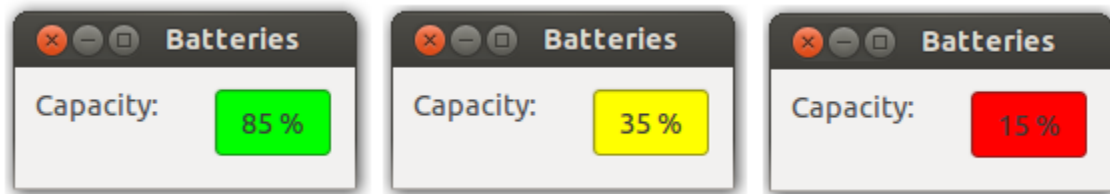


Figura 5.1.2:Diferentes patamares de carga

6 Conclusões e trabalho futuro

Finalizado o estudo das baterias, percebe-se agora que as baterias de ácido-chumbo seladas presentes no robot são mais indicadas para fornecer pulsos de energia, à semelhança do que acontece quando se dá o arranque dos motores de combustão, do que para fornecer energia a taxas constantes e elevadas, como é o caso presente no robot. Assim sendo, as baterias indicadas para este tipo de aplicações são as baterias de ciclo profundo que, por serem especificamente desenhadas para descargas constantes, teriam um melhor desempenho energético e uma vida útil superior. As baterias de ciclo profundo têm também uma outra vantagem face às anteriores pois toleram melhor as descargas profundas que, como se abordou no subcapítulo 4.3, retiram grande parte da capacidade à bateria e assim diminuem a vida útil das mesmas.

A aplicação que foi desenhada para o robot para calcular a energia presente na bateria exige que o robot esteja a trabalhar e com essa aplicação activa. Essa forma de aquisição de dados é no entanto muito limitativa pois, não permite analisar a auto descarga da bateria nem acompanhar a carga das mesmas, devido à arquitectura do robot não permitir uma carga completa enquanto este está ligado. Esta incapacidade em acompanhar o ciclo completo da bateria adiciona complexidade ao cálculo da capacidade e do estado de saúde traduzindo-se num erro superior no cálculo das mesmas. Desta forma, e como trabalho futuro, sugere-se o uso de um dispositivo externo, que seja responsável por gravar internamente os dados relativos ao andamento da tensão e corrente, e que os transfira para o robot assim que este esteja em funcionamento. Este dispositivo externo não requer grande capacidade de processamento pois, ao transferir os dados adquiridos para o robot, será este último a ter o trabalho de os analisar e daí retirar as devidas conclusões. Desta forma sugere-se o uso de um dos inúmeros microcontroladores presentes no mercado, pois além de conseguirem cumprir os requisitos, têm consumos relativamente baixos, não comprometendo assim a vida da bateria do robot. Ao ser externo este equipamento não estará limitado ao funcionamento do robot e como tal aumentará a gama de aquisição de dados permitindo assim um acompanhamento de todo o ciclo da bateria. Este aumento de informação dará azo a que se possam utilizar outros métodos tais como o método da integração da corrente. O design do carregador atrás demonstrado contempla inclusivamente uma saída onde se poderá conectar uma sonda de forma a detectar o final do processo de carga para desta forma “acordar” o robot que usará o processo de carga para entrar num modo de *standby*. Esta sonda poderá também servir como um ponto de referência/calibração para que a “inteligência” do robot faça um *reset* ao processo de integração quando a bateria está completamente carregada e assim comparar o valor resultante das diferentes capacidades calculadas para chegar a uma conclusão sobre o *State of Health*.

Sugere-se também como trabalho futuro que, enquanto não houver uma implementação de um sistema externo, se use o andamento da tensão para indicar quando as baterias estão a

atingir o limite de vida útil pois, como é possível verificar pelos gráficos de descarga presentes no capítulo 4.3, quando as baterias se encontram nessa fase costumam apresentar quedas abruptas de tensão. Este sistema não substituirá o *S.O.H.* indicativo duma percentagem com o nível de saúde da bateria, no entanto será uma mais valia, ao indicar ao utilizador que as baterias estão a apresentar um padrão comportamental diferente do saudável.

Sugere-se também que se proceda a uma calibração dos divisores de tensão existentes na placa de aquisição de dados (Diamond), pois os valores obtidos através desta via mostraram-se desviados dos obtidos com recurso a outros equipamentos.

Como já referido, em paralelo com este estudo, decorreu um estudo que visava o desenvolvimento de uma estação de carga que seria responsável pelo envio de energia para o robot. Esse estudo teve alguns entraves, e como tal, presentemente não existe ainda uma base funcional. Desta forma, o esquema eléctrico referido no capítulo 3 não se encontra implementado estando pendente até conclusão da estação base.

7 Bibliografia

- [1] Ecotricity, "The End Of Fossil Fuels - Our Green Energy - Ecotricity," Ecotricity, [Online]. Available: <http://www.ecotricity.co.uk/our-green-energy/energy-independence/the-end-of-fossil-fuels>. [Acedido em 20 Agosto 2013].
- [2] S. Chambel, "Quotas de Emissão de Poluição," Ideias Ambientais, 14 Abril 2005. [Online]. Available: http://www.ideiasambientais.com.pt/quotas_emissao_poluicao.html. [Acedido em 16 Março 2013].
- [3] Seara, "TurboGás," TurboGás, 2005. [Online]. Available: <http://www.turbogas.pt/gca/index.php?id=90&resolution=1024x768>. [Acedido em 19 Março 2013].
- [4] P. A. Marco Silva, "Centrais Termoeléctricas de Ciclo Combinado," EISNT, 2010.
- [5] R. Saiote, "Estudo de Impacto Ambiental da Central Térmica de Ciclo Combinado de Chamusca," Luso Power S.A., 2009.
- [6] EMPA, "Empa - The ecobalance of Li-ion rechargeable batteries for electric cars - "Greener" than expected," Empa - a Research Institute of the ETH Domain, 27 Agosto 2010. [Online]. Available: <http://www.empa.ch/plugin/template/empa/3/99149/---/l=2>. [Acedido em 25 Julho 2013].
- [7] N. Gordon-Bloomfield, "Lithium-Ion Batteries Get Green Kudos, Better Than Gasoline," Green Car Reports, 31 Agosto 2010. [Online]. Available: http://www.greencarreports.com/news/1048867_lithium-ion-batteries-get-green-kudos-better-than-gasoline. [Acedido em 25 Julho 2013].
- [8] H. Saraiva, "Dez coisas que tem de saber sobre carros eléctricos," Económico, 6 Junho 2009. [Online]. Available: http://economico.sapo.pt/noticias/dez-coisas-que-tem-de-saber-sobre-carros-electricos_14057.html. [Acedido em 21 Agosto 2013].
- [9] "Veículos eléctricos," VeículosEléctricosPT, 10 Fevereiro 2013. [Online]. Available: <http://www.veiculoselectricospt.com/>. [Acedido em 14 Junho 2013].
- [10] GreenSavers, "Carro eléctrico mais potente do mundo é carregado com tecnologia portuguesa," GreenSavers, 17 Abril 2013. [Online]. Available: <http://greensavers.sapo.pt/2013/04/17/carro-electrico-mais-potente-do-mundo-e-carregado-com-tecnologia-portuguesa/>. [Acedido em 11 Junho 2013].

- [11] Rimac Automobili, "Concept_one Battery System," Rimac Automobili, 2012. [Online]. Available: http://www.rimac-automobili.com/concept_one/battery-system-9. [Acedido em 14 Maio 2013].
- [12] N. C. Braga, "Baterias Redox - Carga em minutos pela troca do electrólito," Instituto Newton C Braga, [Online]. Available: <http://newtoncbraga.com.br/index.php/electronica/53-automotivos/495-baterias-redox-carga-em-minutos-pela-troca-do-eletrolito-art039>. [Acedido em 16 Junho 2013].
- [13] S. C. B. Chalasani e T. Beaird, "Battery State of Health Estimation Through Coup de Fouet:Field Experience," 2003.
- [14] Electropaedia, "Battery State of Charge Determination," Electropaedia, [Online]. Available: <http://www.mpoweruk.com/soc.htm>. [Acedido em 20 Outubro 2012].
- [15] H. Xiaosong, S. Fengchun e Z. Yuan, "Estimation of State of Charge of a Lithium-Ion Battery Pack for Electric Vehicles Using an Adaptive Luenberger Observer," *Energies*, vol. 3, pp. 1586-1603, 2010.
- [16] Electropaedia, "Battery Management and Monitoring Systems BMS," Electropaedia, [Online]. Available: <http://www.mpoweruk.com/bms.htm#soc>. [Acedido em 20 Outubro 2012].
- [17] Cadex, "Cadex C8000 Battery Testing System," Cadex, [Online]. Available: <http://www.cadex.com/products/c8000-battery-testing-system>. [Acedido em 20 Agosto 2013].
- [18] S. Rodrigues, N. Munichandraiah e A. K. Shukla, "A review of state-of-charge indication of batteries by means of a.c. impedance measurements," *Journal of Power Sources*, vol. 87, pp. 12-20, 2000.
- [19] P. Singh, S. Kaneria, J. Broadhead e X. Wang, "Fuzzy logic estimation of SOH of 125Ah VRLA batteries," *Intelec 2004*, pp. 524 - 531, Singh, Pritpal.
- [20] Solartron Analytical, "Frequency Response Analyser," Solartron Analytical, [Online]. Available: <http://www.solartronanalytical.com/Our-Products/FRA/index.aspx>. [Acedido em 23 Agosto 2013].
- [21] C. Bose e F. C. Laman, "Battery state of health estimation through coup de fouet," *Intelec*, pp. 597 - 601, 2000.
- [22] Elithion, "Traction packs," Elithion, [Online]. Available: <http://elithion.com/>. [Acedido em 23

Agosto 2013].

- [23] Holos S.A., “ServRobot,” Holos, [Online]. Available: <http://servrobot.holos.pt/>. [Acedido em 26 Agosto 2013].
- [24] E. M. Lakatos e M. d. A. Marconi, Metodologia Científica, São Paulo: Editora Atlas S.A., 1992.
- [25] Eletronica no sapo, “Pilha Voltaica,” Electronica no sapo, [Online]. Available: <http://eletronica.no.sapo.pt/volta.htm>. [Acedido em 05 03 2013].
- [26] Claudio, “A Pilha Voltaica,” Espectro Científico, 20 10 2012. [Online]. Available: <http://quartzodeplasma.wordpress.com/2012/10/20/a-pilha-voltaica/>. [Acedido em 05 03 2013].
- [27] J. Fogaça, “Historia das pilhas,” Brasil escola, [Online]. Available: <http://www.brasilecola.com/quimica/historia-das-pilhas.htm>. [Acedido em 05 03 2013].
- [28] J. Fogaça, “Pilha de Daniell e sua representação,” Brasil Escola, [Online]. Available: <http://www.brasilecola.com/quimica/pilha-daniell.htm>. [Acedido em 5 Março 2013].
- [29] L. M. Luz, “Pilha de Daniell (Pilha eletroquímica),” InfoEscola, 11 09 2007. [Online]. Available: <http://www.infoescola.com/quimica/pilha-de-daniell-pilha-eletroquimica/>. [Acedido em 05 03 2013].
- [30] P. Kuraweil, “Gaston Planté and his invention of the lead–acid battery—The genesis of the first practical rechargeable battery,” *Journal of Power Sources*, vol. 195, n.º 14, pp. 4424-4434, 2010.
- [31] G. d. P. d. C. d. Química, “Nome de Oxidação (Química) | e-escola,” Instituto Superior Técnico, 10 12 2005. [Online]. Available: <http://www.e-escola.pt/topico.asp?id=277>. [Acedido em 08 04 2013].
- [32] Wikipedia, “Standard electrode potential (data page),” Wikipedia, 23 01 2013. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_electrode_potential_%28data_page%29. [Acedido em 16 04 2013].
- [33] O. Deep Cycle BATTERY 101 manufacturing, Realizador, *USBattery*. [Filme]. North America: <http://www.youtube.com/watch?v=DFtepc9Tpmc>, 2011.
- [34] Vision, “www.vision-batt.com,” Vision, 9 2003. [Online]. Available: Obtido do site da Vision: www.vision-batt.com/site/product_files/CP1272.pdf.

- [35] C. H. e. S. Bowden, "Battery Capacity," PVEducation, 2012. [Online]. Available: <http://pvcdrom.pveducation.org/BATTERY/capacity.htm>. [Acedido em 20 03 2013].
- [36] Battery University, "Tracking Battery Capacity and Resistance as part of aging - Battery University," 1999. [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/how_age_affects_capacity_and_resistance. [Acedido em 19 Junho 2013].
- [37] Steca, "Product Catalog 2008/2009," em *Solar Electronics*, 2008, p. 25.
- [38] Sta-eletronica, "Tudo sobre baterias," sta-eletronica, 28 Março 2013. [Online]. Available: <http://www.oslenhas.com.br/tudosobrebaterias.htm>. [Acedido em 20 Junho 2013].
- [39] M. F. Alves, ABC dos Circuitos Eléctricos em Corrente Contínua, Porto, 1999.
- [40] Wikipédia, "Ácido sulfúrico / Polaridade e Condutividade - Wikipédia," Wikipédia, Novembro2012.[Online].Available: http://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido_sulf%C3%BArico. [Acedido em 15 Maio 2013].
- [41] CCBS-Energia, "Como calcular o estado de carga de uma bateria," CCBS-Energia, [Online]. Available: <http://www.ccbs-energia.pt/como-calcular-o-estado-de-carga-de-uma-bateria>. [Acedido em 16 Junho 2013].
- [42] I. F. Vitorino, Estudo de corrosão em placas de baterias chumbo-ácido, Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2011.
- [43] Enersys, "Technical Manual seventh edition," em *Odyssey The Extreme Battery*, 2011, p. 19.
- [44] Microchip, Data Sheet PIC16F87XA, 2003.
- [45] Texas Instruments, "Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage - SLVA477A," Dezembro de 2011, Revisto em Agosto de 2012.
- [46] Unitrode Products from Texas Instruments, "Texas Instruments," Setembro, revisto em Maio 1996, revisto em 2005. [Online]. Available: <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=uc3906&fileType=pdf>. [Acedido em 2012].
- [47] Velleman, "Site da Velleman," Velleman, [Online]. Available: <http://www.velleman.eu/products/view/?country=be&lang=en&id=340443>. [Acedido em 21 Janeiro 2013].

- [48] Unitrode, Texas Instruments Incorporated, "Improved charging methods for lead-acid batteries using the IC3906," 1999.
- [49] Texas Instruments, Darlington Power Transistors Datasheet BDV66D, 1988.
- [50] CIF, "CNC drilling & milling machine 3 & 4 axes - 3D TECHNODRILL 2 - CIF," cif, [Online]. Available: <http://www.cif.fr/en/technodrill/227-perceuse-fraiseuse-3-4-axes-3d-technodrill-2.html>. [Acedido em 28 Maio 2013].
- [51] Philips, "Datasheet Philips 12342BVUBW 12 V 60/55 W," Koninklijke, Philips, 2013, p. 1.
- [52] Finder, "Datasheet Finder 40,61 16A 250V, 24V DC," Findernet, 2012, p. 2.
- [53] Phoenix Contact, "RS Components - Datasheet DIN perforated rail," 13 Julho 2006. [Online]. Available: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/0ffd/0900766b80ffd69f.pdf>. [Acedido em 18 Junho 2013].
- [54] Weidmuller, "Screw Connection Technology," Weidmuller, [Online]. Available: http://www.weidmuller.com/92984/Products/Electrical-Connectivity/Terminal-Blocks/Screw-Connection-W-Series/cw_index_v2.aspx. [Acedido em 25 Fevereiro 2013].